

METODOLOGIA HÍBRIDA PARA EL DESLASTRE DE CARGA EN SISTEMAS ELECTRICOS.

KAROL DANIELA LÓPEZ RODRÍGUEZ

**PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
PEREIRA
2015**

**METODOLOGIA HÍBRIDA PARA EL DESLASTRE DE CARGA EN SISTEMAS
ELECTRICOS.**

KAROL DANIELA LÓPEZ RODRÍGUEZ

**Proyecto de grado
Para optar al título de Ingeniero Electricista**

Directora

Sandra Milena Pérez Londoño, PhD.

Co-director

Luis Fernando Rodríguez García, MSc.

Programa de Ingeniería Eléctrica

Facultad de Ingenierías

Universidad Tecnológica de Pereira

Pereira

2015

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del presidente del Jurado

DEDICATORIA

A mi esposo Carlos Andrés Londoño por su amor, apoyo, comprensión y por ser el compañero incondicional de mis más grandes aventuras.

A mis hijos Carlos Daniel y Ángel David que son mi mayor motivación y la razón de mi constante esfuerzo.

A mi hijo del alma Andrés Felipe, porque sin él mi familia no estaría completa.

A mis padres y mi familia por su eterno respaldo.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme la vida y guiar mi camino, brindándome la oportunidad de realizarme como persona, proporcionándome la perseverancia para seguir adelante a pesar de las adversidades.

A mi esposo Carlos Andrés Londoño Echeverri, por ser mi fuente de seguridad y amor, por su confianza y por buscar a mi lado la realización de nuestros sueños.

A mis hijos Carlos Daniel Londoño López y Ángel David Londoño López, por impulsarme a ser un motivo de orgullo para ellos, y porque fueron el motor para culminar este proyecto.

A Andrés Felipe Londoño, por su sonrisa incansable y por su cariño, que fueron esas dosis de energía y motivación para seguir adelante.

A mis padres, mi nana y mi hermana, por su cariño y apoyo incondicional en el transcurso de mi vida y de mi carrera profesional.

Un sincero agradecimiento a la Phd. Sandra Milena Pérez Londoño, por su comprensión, paciencia, orientación y acompañamiento durante la realización de este proyecto. Por compartir conmigo no solo sus conocimientos profesionales sino también su experiencia de vida.

Al M.Sc. Luis Fernando Rodríguez García, por sus constantes asesorías y por el conocimiento compartido, que fue base fundamental para la realización de este proyecto.

Al Grupo de investigación en calidad de energía eléctrica y estabilidad ICE³ y en especial a su director Juan José Mora, por brindarme un espacio adecuado para la realización de este proyecto.

A todos los profesores del programa de Ingeniería Eléctrica por su formación académica y personal a lo largo de toda la vida universitaria.

A mi hermana del alma ing. Laura Catalina Mejía Echeverry, amiga y compañera incondicional, quién me ha acompañado durante todo el transcurso de mi carrera universitaria.

Al ing. Debbie Johan Arredondo, por compartir desinteresadamente parte de su conocimiento en la etapa final de este proyecto.

Por último pero no menos importante, un agradecimiento a todas las personas que de una u otra manera estuvieron presentes en esta etapa de mi vida.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABLAS	12
GLOSARIO	14
INTRODUCCIÓN	15
1.1 Resumen del proyecto	15
1.2 Definición del problema	15
1.3 Justificación	17
1.4 Objetivos	18
1.4.1 Objetivo general	18
1.4.2 Objetivos específicos	18
1.5 Aportes	18
1.6 Estructura del documento	19
CONCEPTOS BÁSICOS	20
2.1 Deslastre de Carga.....	20
2.1.1 Deslastre de carga por baja frecuencia (UFLS)	20
2.1.2 Deslastre de carga por sobre carga.....	21
2.1.3 Deslastre de carga por baja tensión (UVLS).....	22
2.1.3.1 Esquemas clásicos de deslastre de carga por baja tensión	25
2.3 Estabilidad de tensión	29
2.3.1 Índices de estabilidad de tensión.....	30
2.3.1.1 Índice de estabilidad de tensión en barras SVSI.....	31
2.3.1.2 Índice de estabilidad de tensión en líneas Lmn.....	33

2.3.2 Margen de Cargabilidad	33
METODOLOGÍA PROPUESTA	35
3.1 Visión general	35
3.2 Justificación de la metodología propuesta	36
3.3 Optimización	36
3.3.1 Funciones objetivo para el problema de optimización	36
3.3.1.1 Esquema 1. Deslastre de carga usando índice simplificado de estabilidad de tensión (simplified voltage stability index, SVSI)	37
3.3.1.2 Esquema 2. Deslastre de carga usando el nivel de tensión de cada barra ...	37
3.3.1.3 Esquema 3. Deslastre de carga usando índice de estabilidad de línea (Lmn)	38
3.3.2 Restricciones del problema	39
3.4 Optimización por enjambre de partículas (PSO)	41
3.4.1 Diagrama de flujo del esquema de deslastre	43
3.4.2 Consideraciones para la implementación del problema	44
3.4.3 Diagrama de flujo de la solución del problema de optimización usando optimización de enjambre de partículas PSO y criterios de estabilidad	44
RESULTADOS Y VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA	46
4.1 Descripción del sistema empleado	46
4.2 Descripción de herramientas	46
4.3 Consideraciones finales	46
4.4 Descripción de las pruebas	47
4.5 Incremento de carga en una sola barra del sistema.	47
4.5.1 Deslastre de carga según esquemas propuestos	47
4.5.2 Validación de la importancia del esquema de deslastre	54

4.5.2.1 Deslastre en barra 9	54
4.5.2.2 Deslastre en barra 4	55
4.5.2.3 Deslastre en barras de carga 10, 11, 12 y 13	56
4.6 Desconexión de línea en la zona de generación del sistema	57
4.6.1 Deslastre en todas las barras	57
4.6.2 Deslastre en las barras más críticas	66
4.7 Desconexión de línea en zona de carga del sistema.....	71
4.7.1 Deslastre en todas las barras	71
CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	80
5.1 Conclusiones generales y recomendaciones	80
5.2 Trabajos futuros	81
BIBLIOGRAFIA	83

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1 Deslastre de carga homogéneo	25
Figura 2.2 Deslastre de carga centralizado	26
Figura 2.3 Deslastre de carga descentralizado	27
Figura 2.4 Resumen comparativo de metodologías de deslastre de carga.....	28
Figura 2.5 Colapso de tensión	30
Figura 2.6 Modelo simplificado de una línea de transmisión	33
Figura 2.7 Margen de Cargabilidad	33
Figura 3.1 Propuesta híbrida de deslastre de carga por baja tensión	35
Figura 3.2 Sistema de 4 barras.	38
Figura 3.3 Margen de cargabilidad dentro del esquema de deslastre.	39
Figura 3.4 Modelo completo del problema de optimización	40
Figura 3.5 Concepto de movimiento de una partícula en el algoritmo PSO.....	42
Figura 3.6 Diagrama de flujo del esquema de deslastre de carga por baja tensión.....	43
.....	45
Figura 3.7 Diagrama de la solución del problema de optimización usando PSO	45
Figura 4.2. Función aptitud para esquema de deslastre de carga usando índice Lmn	48
Figura 4.1. Función aptitud para esquema de deslastre de carga usando índice SVSI	48
Figura 4.3 Función aptitud para esquema de deslastre de carga usando nivel de tensión en cada barra	48
Figura 4.4 Carga total deslastrada Vs. Margen de estabilidad λ_{\min}	49
Figura 4.5 Comparación nivel de tensión antes de después de la aplicación de esquemas de deslastre para λ_{\min} 0.1	51
Figura 4.6 Comparación de estabilidad de tensión en barras según índice SVSI para $\lambda_{\min}=0.1$	53
Figura 4.7 Comparación de estabilidad de tensión en líneas según índice Lmn para $\lambda_{\min}=0.1$	53
Figura 4.8 Deslastre de carga usando índice SVSI	57

Figura 4.10 Función aptitud para esquema de deslastre de carga usando índice Lmn	58
Figura 4.9 Función aptitud para esquema de deslastre de carga usando índice SVSI	58
Figura 4.11 Función aptitud para esquema de deslastre de carga usando Nivel de tensión en barras	58
Figura 4.12 Carga total deslastrada Vs. Margen de estabilidad λ_{min}	59
Figura 4.13 Nivel de tensión en todas las barras del sistema después de la aplicación de los esquemas de deslastre de carga para λ_{min} 0.01	62
Figura 4.14 Nivel de tensión en todas las barras del sistema después de la aplicación de los esquemas de deslastre de carga para λ_{min} 0.1	62
Figura 4.15 Comparación de estabilidad de tensión en barras según índice SVSI para $\lambda_{min}=0.01$	64
Figura 4.16 Comparación de estabilidad de tensión en líneas según índice Lmn para $\lambda_{min}=0.01$	64
Figura 4.17 Comparación de estabilidad de tensión en barras según índice SVSI para $\lambda_{min}=0.1$	65
Figura 4.18 Comparación de estabilidad de tensión en líneas según índice Lmn para $\lambda_{min}=0.1$	65
Figura 4.19 Carga total deslastrada Vs. Margen de estabilidad λ_{min}	67
Figura 4.20 Comparación de estabilidad de tensión en barras a partir de índice SVSI para esquemas de deslastre en todas las barras y de deslastre en barras más críticas, para λ_{min} 0.1.....	70
Figura 4.21 Comparación de estabilidad de tensión en líneas a partir de índice Lmn para esquemas de deslastre en todas las barras y de deslastre en barras más críticas, para λ_{min} 0.1.....	71
Figura 4.23. Función aptitud para esquema de deslastre de carga usando índice Lmn	72
Figura 4.22. Función aptitud para esquema de deslastre de carga usando índice SVSI	72
Figura 4.24 Función aptitud para esquema de deslastre de carga usando nivel de tensión en cada barra	72
Figura 4.25. Carga total deslastrada Vs. Margen de estabilidad λ_{min}	73

Figura 4.26 Nivel de tensión en todas las barras del sistema después de la aplicación de los esquemas de deslastre de carga para λ_{\min} 0.01	75
Figura 4.27 Nivel de tensión en todas las barras del sistema después de la aplicación de los esquemas de deslastre de carga para λ_{\min} 0.1	75
Figura 4.28 Comparación de estabilidad de tensión en barras según índice SVSI para $\lambda_{\min}=0.01$	77
Figura 4.29 Comparación de estabilidad de tensión en líneas según índice Lmn para $\lambda_{\min}=0.01$	78
Figura 4.30 Comparación de estabilidad de tensión en barras según índice SVSI para $\lambda_{\min}=0.1$	78
Figura 4.31 Comparación de estabilidad de tensión en líneas según índice Lmn para $\lambda_{\min}=0.1$	79

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 4.1 Carga total deslastrada de acuerdo al margen de estabilidad deseado.	48
Tabla 4.2 Carga total deslastrada por cada barra	49
Tabla 4.3 Carga total deslastrada por cada barra	50
Tabla 4.4 Clasificación de barras críticas según criterio de sensibilidad.....	50
Tabla 4.5 Nivel de tensión después del deslastre	51
Tabla 4.6 Estabilidad de tensión después de la aplicación de los esquemas de deslastre....	52
Tabla 4.7 Estabilidad de tensión después de la aplicación de los esquemas de deslastre....	52
Tabla 4.8 Nivel de tensión después del deslastre de carga	55
Tabla 4.9 Nivel de tensión después del deslastre de carga	55
Tabla 4.10 Porcentaje de la carga total a deslastrar que asumirá la barra para cada margen de cargabilidad.	56
Tabla 4.11 Nivel de tensión después del deslastre de carga	56
Tabla 4.12. Carga total deslastrada de acuerdo al margen de estabilidad deseado.	58
Tabla 4.13 Carga total deslastrada por cada barra	59
Tabla 4.14 Carga total deslastrada por cada barra	60
Tabla 4.15 Clasificación de barras críticas según criterio de sensibilidad.....	60
Tabla 4.16 Nivel de tensión después del deslastre	61
Tabla 4.17 Estabilidad de tensión después de la aplicación de los esquemas de deslastre..	63
Tabla 4.18 Estabilidad de tensión después de la aplicación de los esquemas de deslastre..	63
Tabla 4.19 Barras seleccionadas para realizar el deslastre de carga	66
Tabla 4.20 Carga total deslastrada de acuerdo al margen de estabilidad deseado.	67
Tabla 4.21 Carga total deslastrada por cada barra	68
Tabla 4.22 Carga total deslastrada por cada barra	68
Tabla 4.23 Nivel de tensión después del deslastre	69
Tabla 4.24 Comparación de estabilidad de tensión de esquemas basados en el índice Lmn para el deslastre en todas las barras y deslastre solo en barras críticas.....	70
Tabla 4.25. Carga total deslastrada de acuerdo al margen de estabilidad deseado.	72
Tabla 4.26 Carga total deslastrada por cada barra	73

Tabla 4.27 Carga total deslastrada por cada barra	74
Tabla 4.28 Nivel de tensión después del deslastre.....	74
Tabla 4.29 Estabilidad de tensión después de la aplicación de los esquemas de deslastre..	76
Tabla 4.30 Estabilidad de tensión después de la aplicación de los esquemas de deslastre..	77

GLOSARIO

ANN: Artificial neural networks. Redes neuronales artificiales.

AVR: Automatic voltage regulator. Regulador automático de tensión.

FACTS: Flexible AC transmission systems. Sistemas de transmission flexibles AC.

FVSI: Fast voltaje satability Index. Índice rápido de estabilidad de tensión.

GA: Genetic algorithms. Algoritmos genéticos.

iSAAC: Intelligent supervision and advanced control system. Sistema de supervisión inteligente y control avanzado (proyecto).

MATLAB: Matrix Laboratory. Laboratorio de matrices (software).

PSAT: Power system analysis toolbox. Herramienta para análisis de sistemas de potencia.

PSO: Particle swarm optimization. Optimización por enjambre de partículas.

SEP: Sistema eléctrico de potencia.

SVSI: Simplified voltaje stability index. Índice de estabilidad de tensión simplificado.

UFLS: Under frequency load shedding. Deslastre de carga por baja frecuencia.

UVLS: Under voltaje load shedding. Deslastre de carga por baja tensión.

VSI: Voltage stability index. Índice de estabilidad de tensión.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Resumen del proyecto

El aumento gradual de demanda de energía eléctrica en los sistemas de potencia, no se ha visto compensado en la misma medida con el crecimiento en su infraestructura. Esto ha causado que los sistemas se encuentren trabajando cada vez más cerca de sus límites de operación, lo cual los hace muy susceptibles de presentar problemas de estabilidad de tensión. Es por este motivo que es necesaria la búsqueda de esquemas de monitoreo, que permitan identificar cuando el sistema se encuentra en riesgo de inestabilidad, con el fin de determinar y aplicar acciones de control preventivas o correctivas según sea el caso.

En la literatura se reportan varias metodologías de control empleadas para contrarrestar este problema. El deslastre de carga es una de ellas, la cual consiste en la desconexión de parte de la carga del sistema, para la recuperación de las condiciones normales de operación. Esta técnica se presenta como una herramienta útil para evitar colapsos de tensión ante la ocurrencia de perturbaciones severas, cuando las demás acciones de control han sido agotadas. Existen diversas metodologías clásicas de deslastre como: deslastre de carga homogéneo, deslastre de carga centralizado y el deslastre de carga descentralizado, entre otras; las cuales aunque han evidenciado la conveniencia de la implementación del deslastre de carga en los sistemas de potencia, tienen cantidades limitadas de carga a deslastar, lo que provoca en algunos casos desconexiones innecesarias de carga, implicando problemas de carácter económico; y en otros casos que no se deslastre la cantidad necesaria para restablecer el sistema. La efectividad y viabilidad de esta técnica dentro de un esquema de control radica entonces específicamente, en establecer la localización y la cantidad necesaria de la carga a deslastar para la recuperación del sistema; con el fin de solventar alguna de estas dificultades, se estudiará la inclusión de la optimización por enjambre de partículas, la cual es una metaheurística que presenta ventajas de ejecución que pueden ser beneficiosas para hallar una solución óptima al problema del deslastre, y de esta manera proponer una metodología híbrida (esquema de control evolutivo con la inclusión de criterios de estabilidad) para realizar el deslastre de carga sobre un sistema eléctrico de potencia. Posteriormente se llevará a cabo la implementación de la metodología propuesta en el sistema de prueba IEEE de 14 barras, para diferentes condiciones de operación y en presencia de diversas perturbaciones, y se evaluará su efectividad mediante análisis comparativo.

1.2 Definición del problema

A medida que aumenta la población en el mundo, también lo hace la demanda de energía eléctrica a la red. Los sistemas eléctricos de potencia (SEP) se encuentran cada vez más cerca de sus límites de operación, debido a que el crecimiento de la demanda suele superar las proyecciones que se realizan para el diseño del sistema de transmisión, lo cual no se compensa con el crecimiento de la infraestructura de la red. Esto hace que los sistemas

eléctricos de potencia deban soportar una alta demanda, a la vez que deben satisfacer las restricciones técnicas, económicas y ambientales de su operación. Por lo tanto, esta situación conlleva a que el SEP sea especialmente susceptible de presentar problemas de estabilidad como ya se ha reportado en diferentes referencias [1-4], donde los colapsos de tensión han generado considerables consecuencias a nivel técnico y económico. La estabilidad de tensión es la habilidad del sistema de mantener niveles de tensión aceptables en todas las barras tanto en condiciones normales de operación como ante perturbaciones. La inestabilidad de tensión ocurre cuando ante una perturbación, cambian las condiciones del sistema, lo cual provoca una progresiva e incontrolable caída en los niveles de tensión, debido principalmente a falta de suministro de reactivos en la zona. Por esta razón, la inestabilidad de tensión es un fenómeno local, pero cuando ésta ocurre y no existen acciones de control adecuadas y oportunas, puede llegar a afectar una gran parte del sistema provocando un colapso de tensión. Entre los principales factores que contribuyen al colapso de tensión se encuentran: el control en los límites de generadores, las características de carga y de los dispositivos de compensación de potencia reactiva y la acción de los sistemas de control de tensión [5]. Por estas razones, se convierte en una necesidad, el análisis y estudio de metodologías que permitan identificar la proximidad de un punto de operación del sistema eléctrico de potencia a un colapso de tensión, para posteriormente realizar las respectivas medidas de control.

Las acciones de control correctivas comúnmente usadas son: la sintonización de los parámetros de reguladores automáticos de tensión (AVR, *automatic voltage regulator*, por sus siglas en inglés) [6], el redespacho de generación [7], inclusión de compensadores de potencia reactiva (FACTS) [8], y el modelado del incremento de la carga y la variación en la dirección de dicho incremento para realizar acciones complementarias a través de FACTS [9]. Estas metodologías mencionadas anteriormente son efectivas para controlar pequeñas perturbaciones, sin embargo, se vuelven ineficientes ante perturbaciones severas [5,6]. Una de las metodologías que se presenta como una solución para enfrentar este panorama es el deslastre de carga, que es la desconexión de parte de la carga del sistema, ante la aparición de una perturbación (pérdida de generación, desconexión de elementos, aumento súbito de carga, entre otros), para devolver al sistema condiciones normales y seguras de operación [10]. Una de las dificultades de dicha metodología radica en la definición de un esquema apropiado de desconexión, donde se evalúen la localización y la cantidad mínima de carga a deslastrar, que permita el restablecimiento del sistema. Han sido muchos los esfuerzos por dar solución a las dificultades que presenta esta metodología, como se puede evidenciar en la literatura [9-14, 21-49], dado que los esquemas tradicionales como deslastre de carga homogénea [11], deslastre de carga centralizado, deslastre de carga descentralizado [12-14], entre otros, manejan cantidades predefinidas de carga a deslastrar, provocando que ante la ocurrencia de algunas perturbaciones no se deslastre la cantidad de carga suficiente que se necesita para restaurar las condiciones de operación del sistema y para otro tipo de contingencias se realicen desconexiones innecesarias de carga, implicando problemas de carácter económico; por su parte, las implementaciones que se han realizado hasta hoy, utilizando algoritmos matemáticos como la optimización lineal, presentan dificultades al trabajar con sistemas de gran tamaño, principalmente asociadas al costo computacional.

1.3 Justificación

Teniendo en cuenta el panorama expuesto anteriormente, este proyecto se enfoca en la posibilidad de resolver alguna de las dificultades mencionadas del deslastre de carga, mediante la inclusión de técnicas evolutivas, ya que éstas han demostrado su eficacia en otras áreas. Los algoritmos basados en población se han mostrado como una herramienta útil para dar solución a problemas de optimización en diferentes disciplinas del conocimiento, desde la biología [15], las finanzas [16], hasta la ingeniería aeroespacial [17,18]. En el campo específico de la ingeniería eléctrica, han demostrado ser un apoyo para garantizar la operación confiable, la seguridad y la calidad de la energía; siendo útiles para el reconocimiento de fallas, implementación de metodologías de control de oscilaciones y dar solución a problemas de planeación, diseño y operación de los sistemas, como: el despacho económico/ambiental, la reconfiguración de sistemas de distribución y el mantenimiento de sistemas eléctricos; las cuales son tareas que implican la optimización simultánea de múltiples objetivos que a menudo se encuentran en conflicto entre ellos [19]. Estas técnicas evolutivas, se componen de varias heurísticas que son capaces de resolver tareas de optimización, imitando algunos aspectos de la evolución natural. Se pueden utilizar diferentes niveles de abstracción, pero siempre se está trabajando en toda la población de las posibles soluciones para una tarea determinada [16]. La ventaja de los algoritmos basados en población es que al final de todas las iteraciones no se tiene una única solución sino un conjunto de estas [19]. Uno de estos algoritmos, es la optimización por enjambre de partículas (PSO, *Particle swarm optimization*), el cual es una metaheurística inspirada en el comportamiento social de algunos grupos de animales como un cardumen de peces o una bandada de aves, donde para la solución de un problema específico, cada individuo o partícula toma una decisión teniendo en cuenta no solo su experiencia individual sino también la experiencia del grupo en general. De acuerdo a estos principios de funcionamiento, este algoritmo presenta ventajas de ejecución que pueden ser beneficiosas para hallar una solución óptima al problema del deslastre [20].

Considerando que generalmente los esquemas de desconexión de carga realizan la determinación de la cantidad y la ubicación de la carga a deslastrar a partir de los niveles de tensión en el sistema, este proyecto está enfocado en la realización de una metodología híbrida de deslastre de carga, planteada como un problema de optimización empleando el método de optimización por enjambre de partículas que mediante la inclusión de índices de estabilidad de tensión en su función objetivo, oriente el conjunto de posibles soluciones para encontrar una estrategia óptima que permita solventar los inconvenientes clásicos que presenta el deslastre de carga.

Los resultados de este proyecto pueden ser extendidos para una aplicación en sistemas eléctricos de potencia reales, como es el caso del sistema colombiano, dado que se trata de una herramienta útil que sirve como una estrategia para la pronta restauración de la operación del sistema, evitando la desconexión innecesaria de usuarios y las penalizaciones económicas asociadas a estas. En la actualidad, existe un interés por el ente operador del sistema interconectado nacional XM por el desarrollo de estrategias que garanticen la operación segura de los sistemas de potencia, debido a la disponibilidad de equipos de

mediciones y dispositivos conectados a la red que pueden ser empleados para tales fines [55].

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Implementar una metodología híbrida de deslastre de carga por baja tensión basada en técnicas evolutivas y criterios de estabilidad, en un sistema eléctrico de potencia.

1.4.2 Objetivos específicos

- Realizar una revisión del estado del arte de las diferentes metodologías empleadas para el deslastre de carga como herramienta de control de estabilidad de tensión mediante un análisis comparativo entre ellas.
- Analizar y examinar la pertinencia del uso de alguna metodología evolutiva, en el mejoramiento de la metodología del deslastre de carga.
- Proponer una metodología híbrida (esquema de control evolutivo con la inclusión de índices de estabilidad) para realizar el deslastre de carga sobre un sistema eléctrico de potencia.
- Realizar la implementación de la metodología propuesta en sistema de prueba IEEE, para diferentes condiciones de operación y en presencia de diversas perturbaciones.
- Evaluar la efectividad de la metodología propuesta, mediante análisis comparativo.

1.5 Aportes

En este trabajo de grado se realizó inicialmente una recopilación bibliográfica de los esquemas de deslastre de carga que se han desarrollado hasta la actualidad, estableciendo de manera comparativa ventajas y desventajas de cada una de ellas, lo que permitió la identificación de las principales dificultades que presenta la implementación de esta acción correctiva de control.

Teniendo en cuenta que generalmente los esquemas de deslastre determinan la localización y la cantidad de carga a desconectar a partir del nivel de tensión en las barras del sistema, y tal criterio no asegura la estabilidad del mismo después de su ejecución, se propuso la implementación de una metodología híbrida para el deslastre de carga por baja tensión a partir del uso de la optimización por enjambre de partículas PSO y de la inclusión de criterios de estabilidad como herramienta de solución a los inconvenientes clásicos del deslastre de carga. De esta manera se analizaron tres diferentes alternativas para la

orientación del algoritmo evolutivo hacia una solución óptima, en cada una de ellas se incorpora a la función aptitud un elemento diferente para la elección de la cantidad de carga a deslustrar según la sensibilidad de una barra al colapso. En el primer esquema se trabaja con el índice SVSI [50-52], el cual es usado para el análisis de estabilidad de tensión en sistemas de potencia; el segundo analiza el criterio clásico para efectuar el deslastre, donde a partir del nivel de tensión de cada barra se encuentra la distribución de la carga a desconectar; y el tercero tiene en cuenta el índice de estabilidad de línea Lmn, por medio del cual se analiza a que barras se encuentran conectadas las líneas con mayor riesgo de inestabilidad. De acuerdo con los resultados obtenidos y la comparación de los tres esquemas propuestos se demuestra que a pesar de recuperar los niveles de tensión, el criterio clásico para efectuar el deslastre de carga no garantiza la estabilidad de tensión en el sistema después de su aplicación, a diferencia de los esquemas que realizan la distribución de la carga a partir de criterios de estabilidad como los índices SVSI y Lmn.

1.6 Estructura del documento

El documento de este trabajo de grado se desarrolla en 5 capítulos, los cuales se describen a continuación:

En el capítulo 1, se presentan la definición del problema que incentivó el desarrollo de esta investigación, la justificación del uso de un algoritmo evolutivo para darle solución al problema del deslastre, los objetivos de este proyecto y sus aportes a la investigación.

Posteriormente en el capítulo 2, se expone la fundamentación teórica del deslastre de carga como técnica de control correctiva ante perturbaciones severas en los sistemas de potencia y se muestra una detallada revisión de su estado del arte. Además se presentan los conceptos básicos de estabilidad de tensión y la descripción de algunas herramientas de monitoreo que permiten determinar dicha estabilidad en el sistema eléctrico.

En el capítulo 3, se plantea la inclusión de la técnica de optimización por enjambre de partículas PSO como solución a los inconvenientes clásicos del deslastre de carga. Posteriormente, se propone la incorporación de índices de sensibilidad al colapso de tensión dentro de la función objetivo, para la orientación de este algoritmo evolutivo hacia una solución óptima. Finalmente se muestran en detalle los tres esquemas propuestos para realizar el deslastre de carga mediante esta técnica de optimización.

Las pruebas y la validación de la metodología se presentan en el capítulo 4, donde se implementan en el sistema de prueba IEEE de 14 barras los tres esquemas de deslastre de carga propuestos, los cuales se someten a diferentes condiciones de operación para la comparación de resultados.

Por último en el capítulo 5, se presentan las conclusiones obtenidas y las propuestas para trabajos futuros.

Capítulo 2

CONCEPTOS BÁSICOS

2.1 Deslastre de Carga

El deslastre de carga es una acción correctiva de control, basada en la desconexión de parte de la carga del sistema de potencia, ante la aparición de perturbaciones severas. Este se implementa para evitar el colapso de tensión, cuando todas las demás acciones tanto preventivas como correctivas han sido agotadas y aún el sistema se encuentra en riesgo. El objetivo principal de un esquema de deslastre de carga radica principalmente en encontrar la mínima carga que se requiere deslastrar, para que el sistema recupere condiciones normales de operación después de la ocurrencia de una contingencia severa. Durante las últimas décadas han sido numerosos los esfuerzos de diversos investigadores por analizar y mejorar la estabilidad de los sistemas de potencia, mediante el uso del deslastre de carga como metodología de control. Se han reportado en la literatura especializada, varios esquemas propuestos para realizar esta operación sobre el sistema de potencia, como acción de corrección. Estos esquemas se pueden clasificar de acuerdo a la señal de alarma que se detecta en el sistema para desencadenar la desconexión de carga, a continuación se citan algunos de ellos.

2.1.1 Deslastre de carga por baja frecuencia (UFLS)

Ante la aparición de una perturbación en el sistema, los gobernadores de velocidad de las unidades generadoras llevan al sistema de potencia a una nueva condición de operación, aumentando la potencia generada por las unidades. Si la perturbación es severa, los gobernadores, a causa de la lentitud de su respuesta o debido a limitaciones de potencia de las unidades, no alcanzan a restaurar la operación del sistema. La velocidad de las máquinas, así como la frecuencia del sistema decaerá progresivamente, lo que ocasiona las pérdidas en cadena de unidades generadoras llegando en ocasiones a producir colapsos en el sistema eléctrico [10]. Este decaimiento de la frecuencia se convierte en la alarma principal que desencadena el deslastre de carga y a partir de su medición se realiza la determinación de la localización y la cantidad de carga a desconectar.

Ante el fenómeno de decaimiento de la frecuencia, se han desarrollado diversos esquemas de deslastre de carga, como el abordado en la referencia bibliográfica [5], donde además de exponer los conceptos generales del deslastre, se brinda información acerca de un esquema general basado en la desconexión de carga porcentual por etapas de forma ascendente, de tal manera que se cumplan unos criterios definidos de frecuencia para cada etapa. De manera similar en [10], se estudian y analizan varios esquemas operados por acción de relevos de carga porcentuales ascendentes y descendentes, pero en este caso se evalúa su pertinencia en el sistema eléctrico colombiano. Por su parte, H. E. Lokay y V. Burtnyk

[21], plantean un UFLS basado en la desconexión de porcentajes de carga por etapas a través de relés de baja frecuencia, dichos porcentajes son seleccionados a partir del porcentaje inicial de sobrecarga en el sistema después de la ocurrencia de la perturbación. Análogo a éste en [22], los autores proponen un esquema de UFLS, donde además de tener en cuenta el porcentaje inicial de sobrecarga, se analizan condiciones propias de la contingencia para la decisión final del número de etapas y la distribución de la carga a desconectar en estas.

Teniendo en cuenta que el objetivo principal del deslastre es encontrar una carga mínima que restaure las condiciones de operación del sistema, se ha estudiado la inclusión de términos de sensibilidad de la frecuencia en diferentes esquemas. Investigadores como V. N. Chuvychin, N. S. Gurov, S. S. Venkata y R. E. Brow en [23], proponen una metodología basada en el plano de fase de la frecuencia del sistema, donde las medidas de frecuencia y su tasa de cambio son requeridas para la estimación del estado del sistema en cualquier tiempo, además los autores plantean un control de baja frecuencia para los gobernadores de los generadores que trabajan coordinados con el esquema de deslastre. Por su parte en [24], además de la inclusión de la tasa de cambio de la frecuencia, también se emplea su integral para determinar la cantidad de carga desconectar, y el esquema de deslastre propuesto es llevado a cabo en 5 etapas. Con la aparición de técnicas computacionales de inteligencia artificial para trabajar problemas de optimización, se han desarrollado metodologías donde se busca determinar la cantidad de la carga a desconectar por medio del uso de redes neuronales (ANN) como en [25] y [26], en los cuales se prueban esquemas viables con y sin etapas respectivamente.

El deslastre de carga por baja frecuencia es una herramienta de control favorable y de fácil implementación. Sin embargo, debido a que en su mayoría de esquemas la desconexión se realiza por etapas para prevenir excursiones de frecuencia, su respuesta es lenta lo que en ocasiones provoca problemas adicionales [27].

2.1.2 Deslastre de carga por sobre carga

El estado de emergencia en un sistema puede ocurrir como resultado de la aparición de una perturbación en el mismo, provocando en un estado de post-contingencia, altas corrientes en las líneas de transmisión y por lo tanto, sobrecargas en las mismas, repercutiendo directamente en el incremento de los problemas de seguridad del sistema. Considerando esto, si en un momento dado es detectada una sobrecarga en las líneas del sistema, se iniciará la desconexión de la carga necesaria para la restauración de las condiciones de operación en el mismo.

Con el fin de atenuar las sobrecargas en las líneas de transmisión de un sistema eléctrico después de la aparición de una contingencia, se han desarrollado diferentes esquemas de deslastre de carga, como el mostrado en [28], donde por medio del modelado de la mitigación de la sobrecarga en las líneas como un problema de optimización local sujeta a

restricciones de operación del sistema, es posible obtener la cantidad de carga a deslastrar necesaria para solucionar el problema de sobrecarga. En búsqueda de una estimación más precisa del estado del sistema en cuanto a la sobrecarga de las líneas, se introduce el manejo del índice de sobrecarga [29], el cual es hallado a partir de factores de distribución estadísticos que permiten su cálculo en tiempo real. En este esquema, el sistema es dividido en áreas de coherencia y son usados factores de participación para determinar que barras son susceptibles del deslastre. En los esquemas de deslastre de carga por sobrecarga también se han hecho presentes las técnicas computacionales de inteligencia artificial, incluyendo entre ellos el uso de redes neuronales (ANN) [30], optimización por enjambre de partículas (PSO) [31], y otras heurísticas [32], todos estos esquemas enfocados en la identificación de los buses críticos que son susceptibles de deslastre.

Si bien la sobrecarga en las líneas de transmisión es un evidente síntoma de problemas de seguridad en el sistema, este tipo de metodologías no son muy usadas, debido a que los esquemas de monitoreo de frecuencia y tensión permiten mejores conclusiones acerca de la estabilidad del mismo, permitiendo decisiones más certeras en cuanto al deslastre.

2.1.3 Deslastre de carga por baja tensión (UVLS)

Debido a las grandes transferencias de potencia en la red, los sistemas eléctricos se encuentran cada vez más expuestos a la inestabilidad de tensión. Estas transferencias provocan que las líneas de transmisión operen muy cerca de sus límites. Además, las reservas de generación son mínimas y frecuentemente la potencia reactiva es insuficiente para satisfacer las demandas de carga que requiere la red. Estos aspectos hacen que el sistema sea vulnerable ante la aparición de una perturbación (aumento súbito de carga o pérdida de generación, entre otros), provocando una posible inestabilidad [33]. La inestabilidad de tensión es un evento de naturaleza compleja y local, pero si no se ejercen medidas de control oportunas, sus efectos se pueden extender hacia grandes áreas, ocasionando un colapso de tensión parcial o total del sistema. El deslastre de carga por baja tensión (UVLS), es un recurso que se presenta como una solución viable ante un colapso inminente. Los esquemas tradicionales de deslastre de carga por baja tensión se centran básicamente en las características del sistema después de la perturbación, los niveles de tensión bajos son la alarma principal para desencadenar el deslastre.

Con el propósito de enfrentar un posible colapso de tensión después de la ocurrencia de una perturbación en el sistema, se han reportado en la literatura diferentes metodologías de deslastre de carga por baja tensión. Algunos de estos esquemas manejan un modelo análogo al deslastre de carga clásico por baja frecuencia, como es el caso de la metodología presentada por C. W. Taylor en [34] y del deslastre de carga descentralizado [12-14], donde la desconexión de carga se realiza de manera porcentual y por etapas, y otros en una sola etapa como el deslastre de carga homogéneo [11], donde se deslastra una cantidad de carga igual en todas las barras del sistema. La división del sistema en áreas monitoreadas por relés de baja tensión también ha sido estudiada dentro de los esquemas tradicionales, siendo este el caso del deslastre de carga descentralizado [12-14]. Estas metodologías

tradicionales manejan cantidades predefinidas de carga a deslastrar, provocando en algunos casos que no se deslastre la suficiente cantidad de carga que se necesita para restaurar las condiciones de operación del sistema, y en otras ocasiones que se realicen desconexiones innecesarias de carga, implicando problemas de carácter económico.

En busca de mejores estrategias para hallar la cantidad de carga a deslastrar, se han desarrollado esquemas basados en modelos de carga como el expuesto por S. Arnborg, G. Anderson, D. J. Hill and I. A. Hiskens en [35]. De forma similar en [36] utilizan los parámetros del modelo de carga dinámica, pero en este caso son estimados en línea utilizando una técnica de mínimos cuadrados no lineales y el método de Gauss-Newton. En [37], se propone la inclusión de factores de sensibilidad dentro de los esquemas donde se utilizan para la reprogramación de potencia reactiva y en [38] se estudian modelos de incremento de carga y trayectorias de sensibilidad para implementar el deslastre. Estas metodologías basadas en el modelo de carga dinámica aunque son una alternativa para encontrar la cantidad de carga a deslastrar y su localización, tienen problemas de implementación en sistemas de gran tamaño debido al alto costo computacional.

Teniendo en cuenta los avances en las técnicas de monitoreo del sistema se ha analizado la pertinencia de la inclusión de índices de proximidad al colapso y de estabilidad de tensión. Greene, Dobson y Alvarado [9], introducen el concepto de índice de proximidad al colapso de tensión por medio del margen de cargabilidad como una estrategia para determinar el esquema de deslastre. En [39], los índices se utilizan para determinar las barras susceptibles al deslastre y la cantidad de carga a deslastrar. Los autores plantean dos esquemas de deslastre por etapas: el primero a partir del índice de estabilidad de tensión FVSI y el segundo teniendo en cuenta el índice de estabilidad de línea Lmn, donde se concluye la importancia de utilizar criterios de estabilidad dentro de los esquemas de deslastre para garantizar la estabilidad del mismo después de su aplicación. En [40] se propone un esquema de deslastre mediante la identificación de la barra más débil después de una contingencia por medio del uso de un índice de estabilidad de tensión basado en los valores propios de la matriz jacobiana. Asimismo, se han investigado nuevos índices de estabilidad de tensión basados en el modelo dinámico del motor de inducción como los presentados en [41] y [42]. El primero R-Índice mide el grado de inestabilidad transitoria de tensión y el segundo es un indicador para mostrar la distancia entre el punto de funcionamiento del motor y su punto de estancamiento; ambos son usados para encontrar la localización y la cantidad de carga a deslastrar. Estos esquemas basados en índices a partir del modelo dinámico del motor de inducción, no solo garantizan la estabilidad de tensión sino también la estabilidad de la frecuencia en el sistema después de su aplicación, sin embargo su implementación en sistemas de gran tamaño requiere de una investigación más profunda.

Las técnicas evolutivas se han mostrado como una herramienta muy útil para solucionar problemas de optimización en diversas áreas del conocimiento, y considerando que el deslastre de carga se puede modelar de tal forma, estas técnicas se han implementado como una solución a las dificultades tradicionales del deslastre de carga. Metodologías como los algoritmos genéticos (GA) han sido ampliamente investigados para el mejoramiento de los esquemas de desconexión, como se puede observar en [43], donde Moors, Lefebvre y Van

Cutsem, desarrollan un esquema completo donde se calcula una cantidad mínima de carga a deslastrar que pueda estabilizar el sistema considerando ubicación y costo computacional mediante el uso de un micro algoritmo genético. En [44] se usan para el desarrollo de un esquema de control de deslastre de carga multi-objetivo. En [45], se propone una metodología para el deslastre basada en el uso de algoritmos genéticos para la solución del flujo de carga óptimo con restricciones de estabilidad transitoria. Otros tipos de técnicas evolutivas han sido analizadas en la literatura, en [46, 47] se desarrolla un esquema de control óptimo basado en el uso del margen de cargabilidad como criterio de decisión para iniciar la desconexión de carga. Allí se amplía el concepto tradicional para tener en cuenta tanto efectos técnicos como económicos del deslastre de carga y se utilizan dos metodologías heurísticas para validar los resultados, la optimización de enjambre de partículas y los algoritmos genéticos. Los autores concluyen, después de la comparación de resultados, que el algoritmo desarrollado con PSO obtiene menores cantidades de carga a deslastrar. Por su parte, Pahwa, Scoglio, Das y Schulz [11], investigan y comparan tres estrategias de deslastre de carga. El deslastre homogéneo, un esquema de deslastre usando optimización lineal eficiente para precisar cantidad y localización de la carga a deslastrar solo en sistemas pequeños y la propuesta realizada por los autores que incluye un nuevo árbol de heurística capaz de optimizar el esquema de deslastre, concluyendo al final que el uso de heurísticas para la determinación de la cantidad y la localización de la carga a deslastrar obtiene soluciones más precisas al problema del deslastre que las otras dos técnicas estudiadas.

Recientemente también se ha estudiado la elaboración de esquemas más complejos, donde se incluyen mediciones tanto de frecuencia como de tensión para tomar la decisión del deslastre, como el implementado en [48], donde plantea un esquema adaptativo descentralizado por etapas, y en [49] donde se propone un nuevo índice (Y- índice) para la evaluación de la estabilidad de tensión transitoria con la consideración del cambio en potencia reactiva de la carga y el grado de caída de tensión transitoria. Pese a la diversidad de técnicas para la solución del problema de deslastre de carga, las metodologías presentan dificultades cuando se aplican a sistemas a gran escala, además de un alto costo computacional en su implementación [11].

Los criterios básicos para la implementación de un esquema de deslastre de carga [13] son:

- El esquema de deslastre de carga debe ser debidamente coordinado con todos los dispositivos de protección y demás esquemas de control que se encuentren en el sistema, para evitar problemas adicionales.
- Las tensiones umbrales que se utilicen como alarma para iniciar el deslastre de carga deben ser razonablemente más grandes que la tensión del punto de silla de nodo en las curvas P-V o P-Q.
- Las tensiones umbrales y los tiempos de deslastre en los relés de baja tensión (cuando se utilicen etapas) deben ser comprobados y coordinados, con los demás dispositivos del sistema.

cuenta características propias de las barras de carga y no se determinan porcentajes específicos de deslastre para cada una de ellas, se convierte en una estrategia poco eficiente ya que conlleva a deslastres de carga innecesarios, es decir sobre deslastres.

B) Deslastre de carga centralizado

Este esquema funciona realizando una división del sistema en áreas; en cada barra se encuentran conectados relés de baja tensión y cuando un relé detecta un nivel de tensión umbral establecido, transmite la información de deslastre de carga hacia las demás barras pertenecientes a su área, además cuando se hace necesario se transmite información de deslastre hacia las demás áreas del sistema [12-14]. En la figura 2.2, se muestra un sistema con tres áreas definidas, si ante la presencia de una contingencia uno de los relés de baja tensión del área 1, detecta un determinado nivel de tensión, todas las barras de dicha área realizan la desconexión de carga.

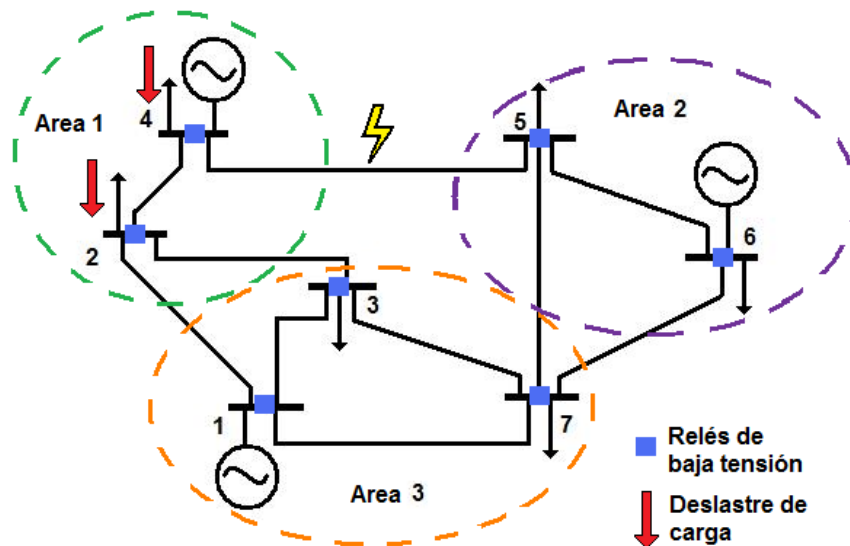


Figura 2.2 Deslastre de carga centralizado

C) Deslastre de carga descentralizado

Este esquema sigue una filosofía similar al esquema de deslastre de carga por baja frecuencia; donde se realiza la desconexión de carga si los relés de baja tensión perciben niveles de tensión por debajo de un umbral establecido [12-14].

Para la implementación de un esquema de deslastre de carga descentralizado por baja tensión es necesario tener en cuenta los siguientes lineamientos [13]:

- El esquema de deslastre debe estar coordinado con los dispositivos de protección y los demás esquemas de control implementados en el sistema, para evitar falsos disparos en los relés de baja tensión y por ende deslastres innecesarios.
- El tiempo para iniciar el deslastre debe ser en segundos y no en ciclos, los tiempos típicos se encuentran entre 3 y 10 segundos.
- El esquema debe deslastrar la cantidad de carga suficiente para recuperar niveles de tensión pero teniendo en cuenta las restricciones del sistema.
- Los valores umbrales de tensión para iniciar el deslastre deben estar entre 0.85 – 0.95 pu.
- Cantidad a deslastrar entre 5 – 20% por etapa.

Un esquema tradicional descentralizado por baja tensión sigue los siguientes pasos [12-14]:

- Deslastrar 5% de la carga de la barra monitoreada cuando el nivel de tensión se encuentre por debajo de 0.90pu por 3.5s.
- Deslastrar 5% de carga adicional cuando el nivel de tensión se encuentre por debajo de 0.92pu por 5s.
- Deslastrar 5% de carga adicional cuando el nivel de tensión se encuentre por debajo de 0.92pu por 8s.

De acuerdo con lo anterior, si después de la ocurrencia de una perturbación un relé de baja tensión conectado a una barra percibe un nivel de tensión determinado, dicha barra realiza deslastre de carga de acuerdo al esquema establecido, como lo muestra la figura 2.3.

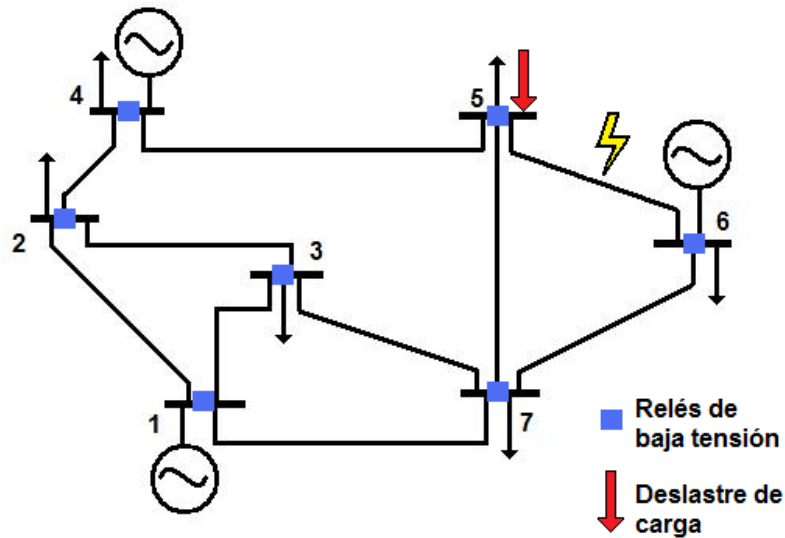


Figura 2.3 Deslastre de carga descentralizado

A continuación en la figura 2.4 se presenta un resumen comparativo de las metodologías de deslastre de carga citadas en la literatura.

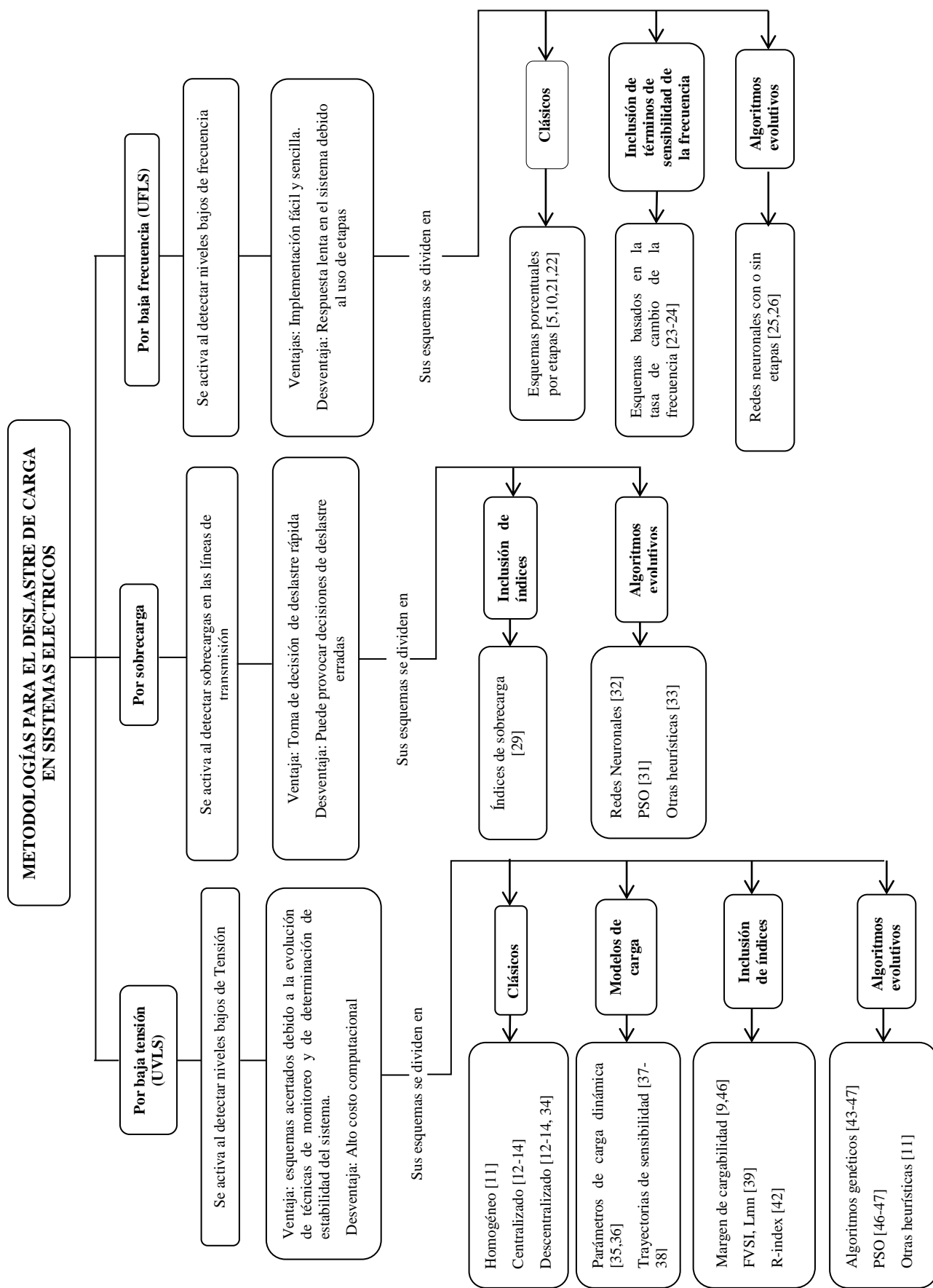


Figura 2.4 Resumen comparativo de metodologías de deslastre de carga

En esta sección se estudiaron los conceptos básicos del deslastre de carga como una acción correctiva para evitar posibles colapsos del sistema ante la aparición perturbaciones severas. A partir de los conceptos expuestos y la revisión bibliográfica realizada, se observa que debido a los avances en técnicas de monitoreo y de evaluación de la estabilidad de tensión en el sistema, el deslastre de carga por baja tensión se presenta como una herramienta de control que permite la exploración de nuevas metodologías para hacer frente a las dificultades clásicas que presenta el problema del deslastre. Esto motiva a una profundización en el estudio de los conceptos de estabilidad de tensión y de las herramientas existentes para su determinación, de tal manera que se puedan incluir en un esquema de deslastre de carga para la orientación del mismo hacia decisiones más acertadas en cuanto a la localización y la cantidad de carga a desconectar.

2.3 Estabilidad de tensión

La estabilidad de tensión hace referencia a la capacidad que tiene un sistema de potencia de mantener tensiones de estado estacionario aceptables en todos los barrajes del sistema de potencia, tanto en condiciones normales de operación del sistema como después de que ocurre una perturbación [5]. Para lograr lo anterior, los operadores de la red se preocupan por sintonizar los equipos de control, de manera que el sistema se opere con las tensiones cerca de los valores nominales, buscando optimizar el flujo de potencia reactiva por la red, con el fin de tener las menores pérdidas posibles [50].

La inestabilidad de tensión es un fenómeno de naturaleza local, que ocurre cuando ante la ocurrencia de una contingencia (aumento súbito de carga, pérdida de generación, o salida de líneas de transmisión), se producen cambios en las condiciones de operación del sistema, provocando una caída de tensión incontrolable en el mismo [5].

El efecto de la inestabilidad de tensión de gran escala, puede ocasionar un colapso, si en la condición posterior a la contingencia, los niveles de tensión se encuentran por debajo de los límites establecidos [50]. Existen muchos factores en los sistemas de potencia reales que contribuyen al colapso de tensión, como la capacidad de transferencia de potencia del sistema de transmisión, las características de las cargas, los límites de capacidad de potencia reactiva de los generadores y las características de potencia reactiva de dispositivos de compensación. Incluso, en algunos casos se atribuye a acciones no coordinadas de sistemas de protección y control [51].

Un colapso está definido por una caída acelerada e incontrolable en los niveles de tensión V en algunas o todas las barras del sistema, hasta llegar a un nivel considerado como muy bajo.

En la Figura 2.5, se muestra un colapso de tensión donde en todas las barras de un sistema eléctrico los niveles de tensión después de la aparición de una perturbación decaen súbitamente hasta hacerse nulos.

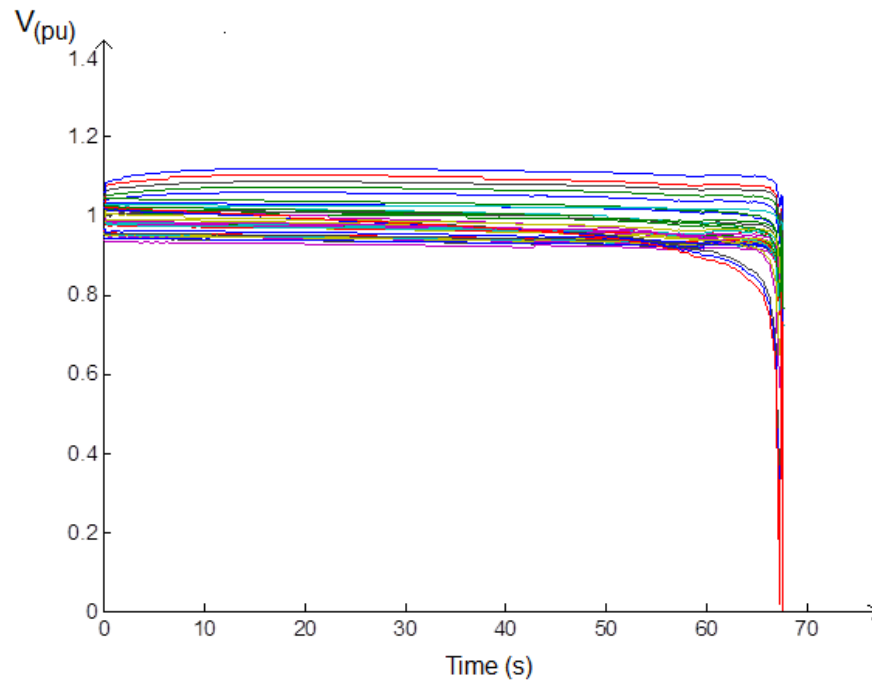


Figura 2.5 Colapso de tensión

2.3.1 Índices de estabilidad de tensión

Los índices de estabilidad de tensión son factores escalares que permiten determinar la proximidad del sistema a un colapso de tensión, en función de cantidades como la matriz de admitancia nodal, resultados de flujos de potencia como magnitudes de tensión o ángulos, entre otros.

De manera complementaria, los índices de estabilidad de tensión permiten detectar barras y líneas críticas, y definir a partir de estos, áreas críticas en estabilidad de tensión para aplicar acciones correctivas. En la actualidad, considerando el creciente uso de dispositivos de monitoreo en los sistemas de potencia, como las unidades de medición fasorial, es posible emplear mediciones reales adquiridas desde el sistema de potencia, lo que permite la implementación de índices de estabilidad de tensión empleando mediciones en línea para el monitoreo del sistema en tiempo real [51].

El principal objetivo de los índices de estabilidad de tensión es la estimación de la distancia desde el punto de operación actual al punto de inestabilidad de tensión [50]. A partir de la investigación de estas herramientas para el estudio de estabilidad de tensión en el sistema, se han realizado muchas propuestas de índices de estabilidad tanto para determinar las

líneas más débiles del sistema, como para identificar las barras más susceptibles de colapso, algunas de estas metodologías son:

a) Índices de estabilidad de línea:

- Lmn [50-53]
- FVSI (Fast voltage stability index) [39,50]
- LVSI [50]
- LPQ [50]

b) Índices de estabilidad de barra

- SVSI [50-52]
- L- index [51-52]
- VSI [52]

A continuación se profundiza en los conceptos básicos del índice de estabilidad de barra SVSI y el índice de estabilidad de línea Lmn, que se utilizarán más adelante dentro de los esquemas de deslastre propuestos en este documento.

2.3.1.1 Índice de estabilidad de tensión en barras SVSI

El índice SVSI [50-52], es usado para el análisis de estabilidad de tensión en sistemas de potencia. Este índice está basado en el concepto de distancia eléctrica relativa, el cual es usado para seleccionar el generador más cercano a una barra de carga específica.

A) Distancia eléctrica relativa

En un sistema dado, la relación entre vectores de corriente (I) y tensión (V) en las barras generadoras (G) y las barras de carga (L) es representada por la matriz de admitancia:

$$\begin{bmatrix} IG \\ IL \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{GG} & Y_{GL} \\ Y_{LG} & Y_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} VG \\ VL \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Reorganizando la matriz,

$$\begin{bmatrix} VL \\ IG \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ZLL & FLG \\ KGL & YGG \end{bmatrix} \begin{bmatrix} IL \\ VG \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Donde $FLG = -|YLL|^{-1}|YLG|$, que representa la relación entre barras de carga y barras generadoras. La distancia eléctrica relativa, es decir la localización relativa de las barras de carga con respecto a las barras de generación son obtenidas de la matriz FLG así:

$$RLG = [A] - abs[FLG] = [A] - abs(|YLL|^{-1}|YLG|) \quad (2.3)$$

Donde $[A]$ es una matriz de dimensiones $(n-g) \times g$, siendo n el número de barras del sistema y g el número de barras generadoras. Todos los elementos de la matriz A son iguales a 1. La distancia eléctrica entre barras generadoras y barras de carga, se puede obtener de la matriz RLG.

Después de identificar el generador más cercano a una barra de carga específica, se calcula la caída de tensión en la impedancia de Thévenin ΔV_i Usando (2.4).

$$\Delta V_i = \sum_{b=1}^{nj-1} |V_b - V_{b+1}| \cong |V_g - V_i| \quad (2.4)$$

Donde, V_g y V_i son tensiones fasoriales de la barra del generador más cercano y la barra de carga analizada.

Debido a las simplificaciones realizadas para el desarrollo de este índice, es necesaria la inclusión de un factor de corrección para evitar la pérdida de sensibilidad sobre el punto crítico del sistema. Este factor β se calcula mediante la ecuación (2.5).

$$\beta = 1 - (\text{máx} (|Vm| - |Vl|))^2 \quad (2.5)$$

Este factor se asocia con la mayor diferencia entre las magnitudes de las tensiones de dos barras m y l del sistema, cuyos valores se encuentran disponibles si se consideran flujos de potencia, mediciones del sistema, estimación de estado, entre otros.

Finalmente, el índice SVSI se obtiene:

$$SVSI_i = \frac{\Delta V_i}{\beta * V_i} \quad (2.6)$$

2.3.1.2 Índice de estabilidad de tensión en líneas Lmn

El índice de estabilidad de línea [51,53], es un índice basado en el concepto de flujo de potencia a través de una línea como la mostrada en la figura 2.6.

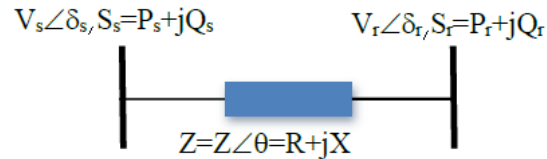


Figura 2.6 Modelo simplificado de una línea de transmisión

Este índice puede ser calculado de acuerdo a la expresión (2.7)

$$L_{mn} = \frac{4 \times Q_r}{[V_s \sin(\theta - \delta)]^2} \quad (2.7)$$

Basados en el índice de estabilidad Lmn, es posible predecir un colapso de tensión, ya que si este índice permanece menor a 1 el sistema es estable, pero si el índice alcanza o supera la unidad, el sistema pierde estabilidad y el colapso de tensión ocurre.

2.3.2 Margen de Cargabilidad

El margen de cargabilidad es una herramienta usada para asegurar la estabilidad de tensión en un sistema. Para un punto de operación específico, es la cantidad de carga adicional en un patrón específico de incremento de carga que puede causar el colapso de tensión [46].

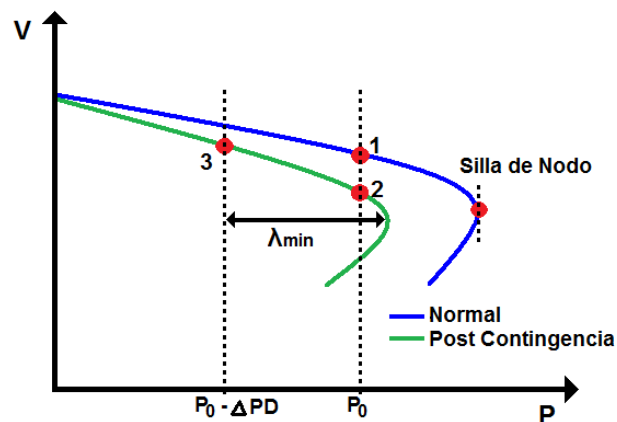


Figura 2.7 Margen de Cargabilidad

La figura 2.7, muestra el comportamiento del sistema antes y después de una perturbación. Si se supone que el sistema se encuentra en operación normal en el punto 1 y ocurre una contingencia en el sistema, la curva P-V cambia tal como se muestra; el nuevo margen comienza a ser inseguro (punto 2) y el sistema estará operando muy cerca de sus límites.

El margen de cargabilidad mínimo λ_{\min} , será entonces la cantidad de carga que asegure un punto de operación confiable para el sistema (punto 3), es decir que si en algún momento el margen del sistema es menor que este λ_{\min} predefinido, el sistema estará en riesgo de inestabilidad.

En esta sección se estudiaron los conceptos básicos de la estabilidad de tensión y de algunas de las metodologías existentes para la evaluación de la proximidad del sistema al colapso de tensión. Estas herramientas se convierten en una posibilidad para el mejoramiento de los esquemas de deslastre de carga por baja tensión, puesto que permiten la determinación acertada de la susceptibilidad de los elementos del sistema al colapso.

Capítulo 3

METODOLOGÍA PROPUESTA

3.1 Visión general

Siguiendo el análisis a las metodologías desarrolladas por los investigadores en torno a este problema, es notorio que la inclusión de técnicas computacionales inteligentes y de herramientas que permitan conocer la estabilidad de tensión en un sistema eléctrico, se han convertido en una alternativa factible para solventar los desafíos que conlleva la implementación de un esquema de deslastre de carga.

Teniendo en cuenta los conceptos expuestos en el capítulo anterior, este proyecto está enfocado en proponer una metodología híbrida que incluya tanto criterios de optimización como de estabilidad de tensión para realizar el deslastre de carga. Una de las técnicas computacionales investigadas es la optimización de enjambre de partículas PSO, que por sus características presenta cualidades favorables en la búsqueda de soluciones factibles al problema del deslastre.

De esta manera, la propuesta híbrida de deslastre de carga por baja tensión se plantea como un problema de optimización solucionado a partir de la optimización por enjambre de partículas PSO, que a través de la inclusión de índices de estabilidad encuentre la localización y la cantidad de carga a desconectar necesaria para reestablecer los niveles de tensión en el sistema. De acuerdo con esto, si en un sistema de potencia que se encuentre operando bajo unas condiciones dadas, se detectan niveles de tensión por debajo de un umbral establecido, la propuesta sería la acción correctiva a implementar para recuperar en el sistema condiciones seguras de operación, como se muestra en la figura 3.1.

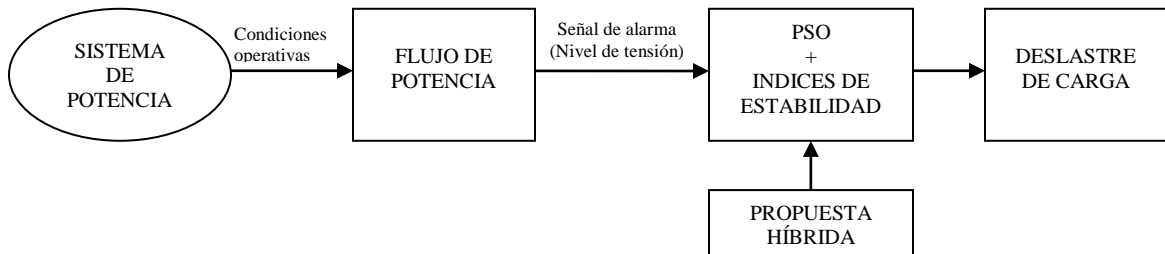


Figura 3.1 Propuesta híbrida de deslastre de carga por baja tensión

3.2 Justificación de la metodología propuesta

De acuerdo a los conceptos abordados en los capítulos anteriores, la metodología que se propone en este documento es un esquema de deslastre de carga por baja tensión; esto, teniendo en cuenta que los avances realizados en las técnicas de estudio de la estabilidad de tensión en los sistemas de potencia, como los índices estudiados anteriormente, permiten la exploración de nuevas metodologías que garanticen la operación estable y confiable del mismo, aún después de la aparición de una perturbación.

Teniendo en cuenta las investigaciones realizadas acerca de la inclusión de técnicas evolutivas computacionales dentro de los esquemas de deslastre de carga por baja tensión, la optimización de enjambre de partículas se ha mostrado como una de las más destacadas en la búsqueda de soluciones óptimas al problema del deslastre, obteniendo mejores resultados en comparación con otras técnicas evolutivas estudiadas como los algoritmos genéticos [46, 47]. Esto debido a que las características del modelo de búsqueda del PSO permiten una adecuada adaptación del deslastre de carga por baja tensión dentro de esta metodología.

Considerando estas razones, el deslastre de carga por baja tensión se plantea como un problema de optimización, el cual se resuelve empleando el método de optimización por enjambre de partículas, en el que se incluirán unos criterios de sensibilidad de las barras del sistema al deslastre de carga, con el fin de orientar el enjambre de partículas hacia las soluciones más factibles del problema.

3.3 Optimización

3.3.1 Funciones objetivo para el problema de optimización

El deslastre de carga por baja tensión tiene como objetivo principal, la desconexión de la mínima carga requerida para recuperar condiciones seguras de operación en el sistema de potencia; dicha carga mínima es posible hallarla mediante el planteamiento del deslastre como un problema de optimización.

De acuerdo con lo anterior, el deslastre de carga por baja tensión es modelado como un problema de optimización en el cual se busca mediante la minimización de la función objetivo, encontrar la mínima cantidad de deslastre para cada barra que logre reestablecer los niveles de tensión en el sistema y que además cumpla con las restricciones establecidas para el problema.

Para la selección de las cantidades de carga a deslastrar en cada barra de acuerdo a la susceptibilidad de cada una al colapso de tensión, se desarrollaron tres esquemas, en los cuales se incorporaron a cada uno de ellos un criterio diferente de sensibilidad en la función

aptitud. En el primer esquema el criterio de sensibilidad usado es el índice SVSI, el cual es utilizado para el análisis de estabilidad de tensión en sistemas de potencia; el segundo analiza el criterio tradicional para realizar el deslastre de carga por baja tensión, donde a partir del nivel de tensión de cada barra se encuentra el total de carga a deslastrar; y el tercero tiene en cuenta el índice de estabilidad de línea Lmn, por medio del cual se analiza a que barras se encuentran conectadas las líneas con mayor riesgo de inestabilidad.

A continuación se describe en detalle la función aptitud implementada para cada esquema propuesto.

3.3.1.1 Esquema 1. Deslastre de carga usando índice simplificado de estabilidad de tensión (simplified voltage stability index, SVSI)

Teniendo en cuenta el concepto abordado el capítulo 3, el índice de estabilidad de tensión SVSI, es incluido dentro del esquema de deslastre de carga como un criterio de sensibilidad para la orientación del algoritmo en la distribución de la carga a deslastrar entre las barras del sistema, según su contribución al colapso de tensión. De esta manera, las barras que tengan un mayor valor de SVSI serán mejores candidatas para el deslastre de carga.

La función aptitud para realizar el deslastre de carga haciendo uso del índice simplificado de estabilidad de tensión SVSI está definida como:

$$\min \left(\sum_{i=1}^{NL} \frac{\Delta PD_i}{SVSI_i} \right) \quad (3.1)$$

Donde ΔPD_i es la carga a deslastrar, $SVSI_i$ el índice de estabilidad en cada barra y NL el número total de barras PQ del sistema.

Nota: Teniendo en cuenta que el índice SVSI se calcula solo para las barras de carga exclusivas (sin generación), a las barras que tienen generación y carga a la vez se les asignó como SVSI el valor de 0.00001 para evitar problemas de compilación del algoritmo.

3.3.1.2 Esquema 2. Deslastre de carga usando el nivel de tensión de cada barra

El nivel de tensión propio de cada barra, relaciona directamente las barras que presentan cambios en sus condiciones de operación después de la ocurrencia de una contingencia en el sistema. La consideración de este concepto es el usado tradicionalmente para la elección de las barras a deslastrar.

La función aptitud para realizar el deslastre de carga haciendo uso del nivel de tensión de cada barra está definido como:

$$\min(\sum_{i=1}^{NL} V_i * \Delta PD_i) \quad (3.2)$$

Donde ΔPD_i es la carga a deslastrar, V_i el nivel de tensión en cada barra y NL el número total de barras PQ del sistema. Para este esquema entre menor sea el nivel de tensión de una barra más susceptible es esta del deslastre.

3.3.1.3 Esquema 3. Deslastre de carga usando índice de estabilidad de línea (Lmn)

Como se expuso anteriormente en el capítulo 3, el índice de estabilidad de línea es utilizado para identificar un inminente colapso de tensión en el sistema. Este concepto es incluido dentro del esquema de deslastre de carga para identificar a que barras se encuentran conectadas las líneas que presentan inestabilidad de tensión después de la aparición de una perturbación en el sistema.

Considerando que para el problema específico del deslastre de carga, se necesita encontrar cuales son las barras susceptibles de desconexión de carga, y el Lmn es un índice de línea, la sensibilidad de una barra al deslastre estará dada por el mayor Lmn encontrado para una línea interconectada a dicha barra. En la figura 3.2 se muestra un sistema de cuatro barras.

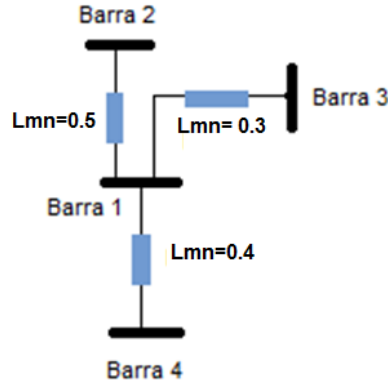


Figura 3.2 Sistema de 4 barras.

Según lo dicho anteriormente el Lmn asignado a la barra 1 sería 0.5.

La función aptitud para realizar en deslastre de carga haciendo uso del índice de estabilidad de línea Lmn está definida como:

$$\min\left(\sum_{i=1}^{NL} \frac{\Delta PD_i}{Lmn_i}\right) \quad (3.3)$$

Donde ΔPD_i es la carga a deslazar, Lmn_i el índice de estabilidad de línea asociado a cada barra, calculado de acuerdo a la explicación anterior y NL el número total de barras PQ del sistema. De forma similar al esquema 1, entre mayor sea el índice Lmn para una barra, más atractiva será para realizar el deslastre.

3.3.2 Restricciones del problema

Considerando que el objetivo del deslastre de carga como acción correctiva, es la recuperación de las condiciones de operación seguras en el sistema, las funciones aptitud anteriormente expuestas para cada propuesta de deslastre de carga por baja tensión, se encuentran sujetas a restricciones propias del sistema de potencia. Estas restricciones están asociadas a que la cantidad de deslastre de carga seleccionada para cada barra cumpla con el balance de potencia tanto activa como reactiva entre generación y carga, como se muestra en las ecuaciones 3.4 y 3.5.

$$P_{Gi}^0 - P_{Di}^0 + \Delta P_{Di} = \sum_{j=1}^N |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\delta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (3.4)$$

$$Q_{Gi}^0 - Q_{Di}^0 + \Delta Q_{Di} = - \sum_{j=1}^N |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\delta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (3.5)$$

Teniendo en cuenta los conceptos expuestos en el capítulo 2, para el desarrollo de esta metodología es incluido un margen de cargabilidad en las ecuaciones del flujo de potencia. De acuerdo con la figura 3.3, si el sistema se encuentra en el punto de operación 1 (muy cerca del punto crítico), el deslastre de carga sería la acción correctiva que se implementaría en el sistema para llevarlo a un nuevo punto de operación 2, con el fin de garantizar un margen de cargabilidad (λ_{min}) suficiente, para evitar el colapso y por ende garantizar la estabilidad de tensión en el sistema. Esto se expresa matemáticamente como se muestra en las ecuaciones 3.6 y 3.7.

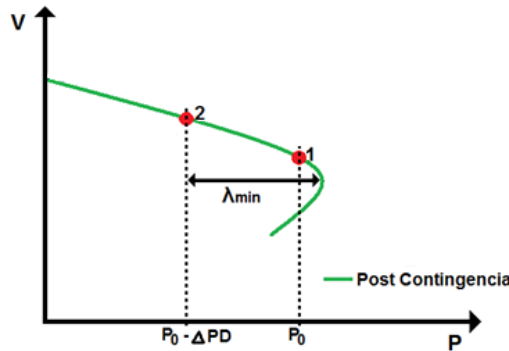


Figura 3.3 Margen de cargabilidad dentro del esquema de deslastre.

$$(1 + \lambda_{min})(P_{Gi}^0 - P_{Di}^0 + \Delta P_{Di}) = \sum_{j=1}^N |V_i^c| |V_j^c| |Y_{ij}| \cos(\delta_{ij} + \delta_j^c - \delta_i^c) \quad (3.6)$$

$$Q_{Gi}^0 - (1 + \lambda_{min})(Q_{Di}^0 - \Delta Q_{Di}) = - \sum_{j=1}^N |V_i^c| |V_j^c| |Y_{ij}| \sin(\delta_{ij} + \delta_j^c - \delta_i^c) \quad (3.7)$$

Las demás restricciones del modelo matemático se encuentran asociadas a los niveles máximos y mínimos de tensión para el sistema tanto en condiciones de deslastre como considerando el margen de cargabilidad dentro de las ecuaciones de flujo, además se definen valores máximos y mínimos del deslastre para cada barra y asimismo se define el factor de potencia fijo.

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max}, i \in N_L \quad (3.8)$$

$$V_i^{cmin} \leq V_i^c \leq V_i^{cmax}, i \in N_L \quad (3.9)$$

$$\Delta PD_i^{min} \leq \Delta PD_i \leq \Delta PD_i^{max}, i \in N_D \quad (3.10)$$

$$\frac{\Delta PD_i}{P_{Di}^0} = \frac{\Delta QD_i}{Q_{Di}^0}, \text{ factor de potencia fijo} \quad (3.11)$$

Los subíndices “G” y ”D” indican generación y demanda de la barra i respectivamente, el superíndice “0” se refiere al estado inicial del sistema y el superíndice “C” es el estado de post-contingencia [46]. El planteamiento del modelo completo se muestra en la figura 3.4.

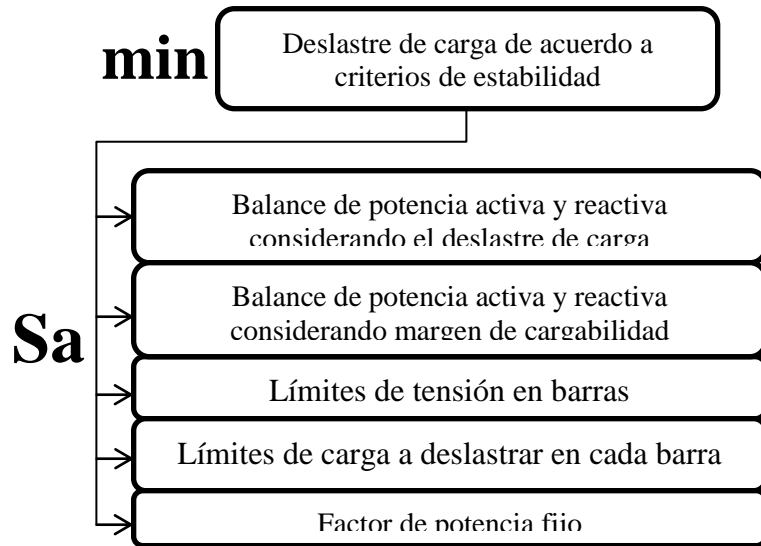


Figura 3.4 Modelo completo del problema de optimización

3.4 Optimización por enjambre de partículas (PSO)

Una vez se formula el problema de optimización, tanto con su función objetivo y sus restricciones, se explica la técnica de solución para el problema, que en este proyecto, se trata de la técnica de optimización por enjambre de partículas.

La optimización por enjambre de partículas (PSO, *Particle swarm optimization*) [46], es una técnica computacional basada en la simulación del comportamiento social de los grupos de animales, como una bandada de pájaros o un cardumen de peces. Al igual que otras técnicas de búsqueda estocástica, PSO se inicializa mediante la generación de una población de soluciones al azar, llamadas enjambre. Cada individuo se conoce como una partícula y presenta una posible solución al problema de optimización.

Una partícula en PSO, tiene una memoria que conserva la mejor experiencia, que se obtiene durante el periodo de búsqueda de la solución. En esta técnica, cada posible solución se asocia con un vector de velocidad. El vector de velocidad es constantemente ajustado de acuerdo a la experiencia correspondiente a cada partícula y a las experiencias de los compañeros de la misma. En consecuencia, en el algoritmo PSO, las mejores experiencias del grupo siempre se comparten con todas las partículas, y por lo tanto se espera que las partículas se muevan hacia las mejores áreas de solución. Dentro del algoritmo de enjambre de partículas es posible trabajar buscando la mejor posición global, (*gbestPSO, global best particle swarm optimization*) que es una aplicación para la que la limitación de posibles soluciones sea todo el enjambre, o buscando la mejor posición local, (*lbestPSO, local best particle swarm optimization*) que se refiere a la división de todo el enjambre en zonas y se buscan posiciones óptimas para cada una. Esta característica diferencia el método PSO de otras técnicas evolutivas de optimización existentes [46].

Las principales características del algoritmo PSO son las siguientes [20]:

- a) En PSO las partículas intercambian información. Estas modifican su dirección en función de las direcciones o experiencias anteriores de las partículas de su vecindario (Memoria del vecindario).
- b) PSO almacena la experiencia propia o historia de cada agente. La partícula decide su nueva dirección en función de la mejor posición por la que pasó anteriormente (Memoria del individuo).
- c) Suele tener una convergencia rápida a buenas soluciones.
- d) La población del algoritmo se inicia de forma aleatoria y evoluciona iteración tras iteración.
- e) La búsqueda persigue siempre la solución más óptima posible, basado exclusivamente en los valores de la función objetivo.
- f) Es una técnica estocástica referida en fases (inicialización y transformación).
- g) PSO no crea nuevas partículas durante su ejecución, siempre son las mismas partículas iniciales modificadas a lo largo del proceso.

El movimiento de una partícula dentro de un enjambre según la mejor experiencia del grupo se puede ilustrar en la figura 3.5:

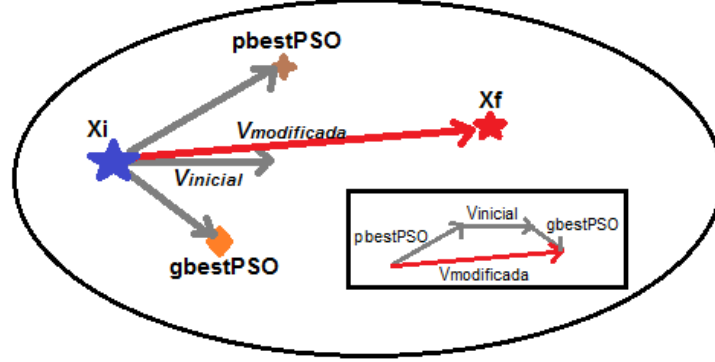


Figura 3.5 Concepto de movimiento de una partícula en el algoritmo PSO.

En un espacio de búsqueda n- dimensional la posición y la velocidad del individuo pueden ser representadas como vectores $x_i = (x_{i1}, x_{i2} \dots x_{in})$ y $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots v_{in})$ respectivamente.

La mejor experiencia previa de la partícula i-ésima es grabada como $mejorpos_i = (mejorpos_{i1}, mejorpos_{i2}, \dots mejorpos_{in})$, y la mejor entre todas las experiencias de todos los individuos almacenadas por el grupo es referida como $mejorpos_g$.

La velocidad y la posición de las partículas son modificadas en cada iteración mediante las siguientes ecuaciones:

$$v_{id}^{(t+1)} = \omega v_{id}^{(t)} + c_1 rand_1(0)(mejorpos_i - x_{id}^{(t)}) + c_2 rand_2(0)(mejorpos_g - x_{id}^{(t)}) \quad (3.12)$$

$$x_{id}^{(t+1)} = x_{id}^{(t)} + v_{id}^{(t+1)} \quad (3.13)$$

En estas ecuaciones, $i=1,2,3,\dots,m$ es el índice para cada partícula y t es el número de iteración. Las constantes C_1 y C_2 son pesos que controlan los componentes cognitivo y social; ω es el factor de inercia en cada iteración, su valor proporciona un balance entre las exploraciones locales y globales. Este valor decrece linealmente en cada iteración de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$\omega^{(t+1)} = \omega_{max} - \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{t_{max}} t \quad (3.14)$$

3.4.1 Diagrama de flujo del esquema de deslastre

Estos tres esquemas presentados, son inicializados si ante una perturbación el nivel de tensión en alguna barra se encuentra por debajo de la tensión umbral que para las pruebas se estableció en 0.9 pu. El deslastre de carga por baja tensión es llevado a cabo siguiendo el diagrama de flujo mostrado en la figura 3.6.

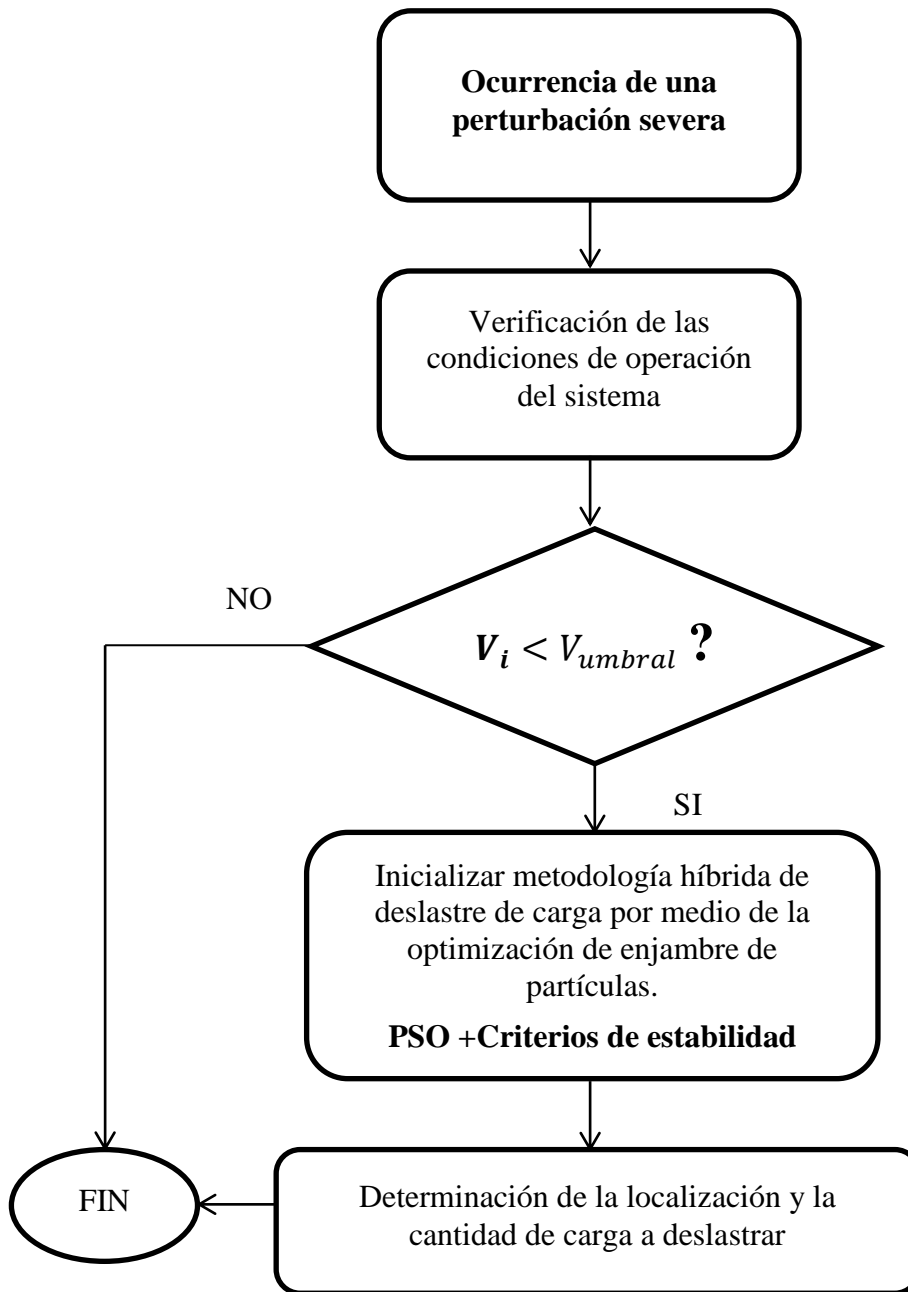


Figura 3.6 Diagrama de flujo del esquema de deslastre de carga por baja tensión

3.4.2 Consideraciones para la implementación del problema

Para la aplicación de la optimización de enjambre de partículas al problema específico del deslastre de carga, se tienen en cuenta las siguientes consideraciones

- El vector de posición xi contiene n partículas, las cuales son generadas inicialmente de manera aleatoria y evolucionan a través de la ejecución del algoritmo; cada partícula está conformada por las posibles cantidades de carga a ser deslastradas por cada barra, considerando esto las partículas son restringidas para que solo se pueda deslastrar un porcentaje determinado en cada barra de acuerdo a su carga total.
- Se consideran infactibles aquellas soluciones que no eleven los niveles de tensión por encima del umbral establecido, o que deslastren cantidades de carga superiores al porcentaje determinado para cada barra, en cuyo caso se penalizará la función aptitud sumando una cantidad de 1×10^{10} .
- El criterio de parada de cada algoritmo es un número máximo de iteraciones.

3.4.3 Diagrama de flujo de la solución del problema de optimización usando optimización de enjambre de partículas PSO y criterios de estabilidad

La búsqueda de la solución al problema de optimización del deslastre de carga a través de la optimización de enjambre de partículas y de índices de estabilidad de tensión es llevada a cabo como se muestra en el diagrama de flujo de la figura 3.7.

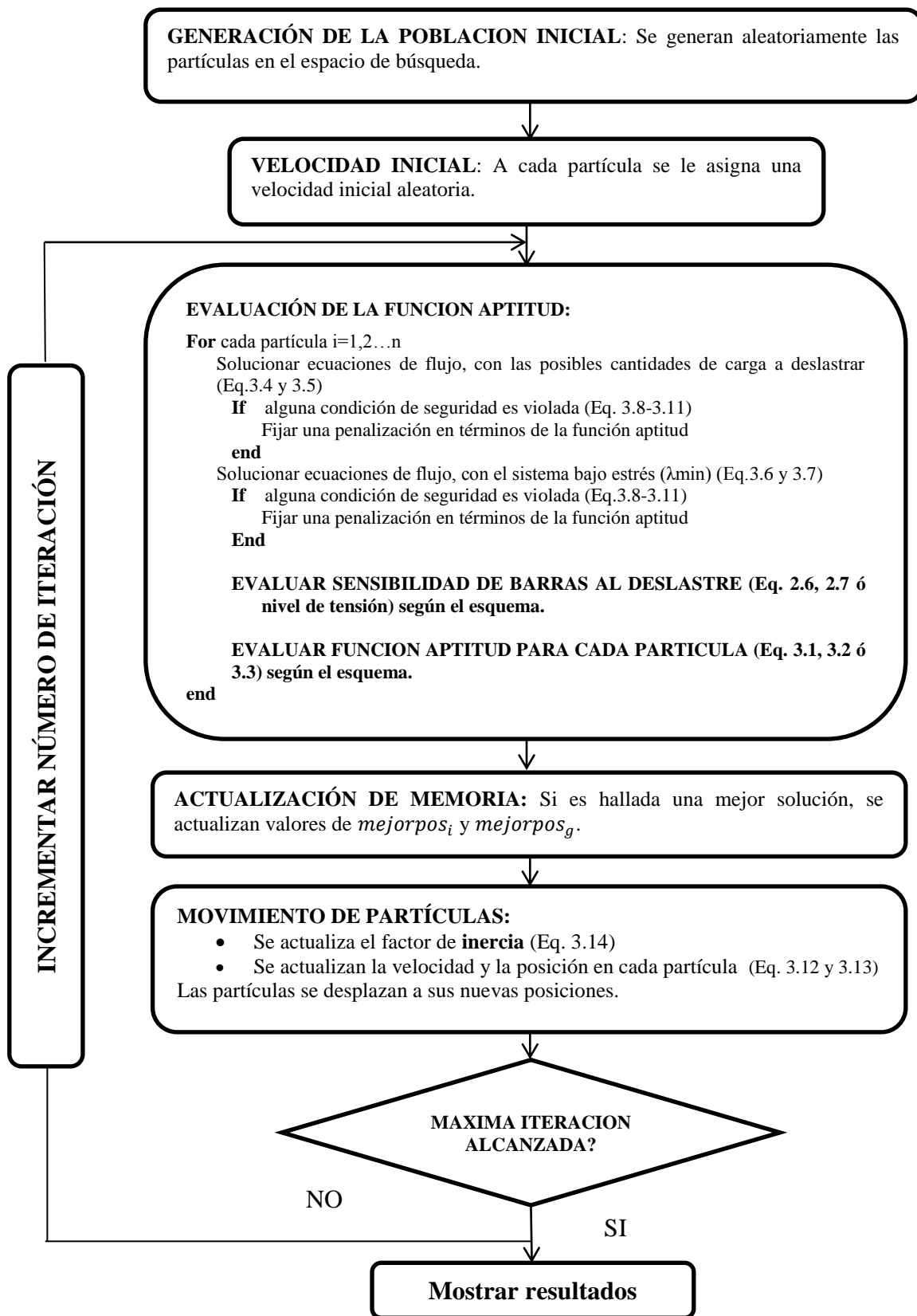


Figura 3.7 Diagrama de la solución del problema de optimización usando PSO

Capítulo 4

RESULTADOS Y VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA

4.1 Descripción del sistema empleado

De acuerdo a las metodologías planteadas en el capítulo anterior, en este capítulo se presentan los resultados de la implementación de los esquemas de deslastre de carga por baja tensión propuestos y su comparación. Estos esquemas fueron implementados sobre el sistema de prueba IEEE de 14 barras, cuya descripción detallada se encuentra en la referencia bibliográfica [54].

4.2 Descripción de herramientas

Todas las pruebas fueron ejecutadas en el software Matlab®, el cual es ampliamente utilizado para el desarrollo de herramientas computacionales, y es considerado como un entorno de cálculo técnico, que brinda grandes prestaciones para desarrollo y visualización de análisis numéricos. Los flujos de carga necesarios dentro de la implementación de la optimización de enjambre de partículas para revisar permanentemente el estado del sistema y hallar la solución factible para el problema del deslastre, fueron ejecutados a través del “toolbox” PSAT (Power System Analysis Toolbox), que es una herramienta desarrollada para ser su ejecución en Matlab®, y que proporciona una serie de soluciones que permite realizar análisis de sistemas de potencia, además de permitir la incorporación de estos sistemas mediante un entorno gráfico basado en Simulink.

4.3 Consideraciones finales

Para la realización de las pruebas se establecieron las siguientes condiciones para todos los esquemas propuestos:

- El vector de posición xi contiene 10 partículas, y cada una de ellas es restringida para que solo se pueda deslastrar hasta el 40% de la carga de cada barra.
- El nivel de tensión máximo en cada barra $V_{m\acute{a}x}$ es igual a 1.1pu y el nivel de tensión mínimo $V_{m\grave{i}n}$ es igual a 0.95pu.
- El vector de velocidad vi , es inicializado aleatoriamente en un rango de -0.002 a 0.002, y es modificado en cada iteración de acuerdo a la ecuación (8).
- Las constantes C_1 y C_2 que controlan el componente cognitivo y social respectivamente, son fijadas en 1.7 (Valor hallado experimentalmente).

- El factor de inercia máximo $\omega_{m\acute{a}x}$ es establecido en 0.9 y el mínimo ω_{min} en 0.4.

Durante cada prueba realizada, los esquemas de deslastre de carga a través del uso de la optimización de enjambre de partículas fueron ejecutados 20 veces para cada margen de cargabilidad requerido, con 100 iteraciones cada uno; los resultados aquí mostrados fueron los mejores obtenidos para cada esquema.

4.4 Descripción de las pruebas

Las condiciones de operativas bajo las cuales se sometió el sistema IEEE de 14 barras, para verificar la validez de la metodología propuesta fueron:

- a) Incremento en la carga de una sola barra del sistema ubicada en la zona de carga del mismo, la barra seleccionada fue la barra 14.
- b) Salida de una de las líneas ubicada en la zona de generación del sistema, la línea desconectada fue la línea 3-2, posteriormente se incrementó la carga en todas las barras del sistema.
- c) Salida de una de las líneas ubicada en la zona de carga del sistema, la línea desconectada fue la línea 9-10, posteriormente se incrementó la carga en todas las barras del sistema.

4.5 Incremento de carga en una sola barra del sistema.

Con el fin de mostrar el funcionamiento de los esquemas de deslastre propuestos se realiza para el sistema de prueba IEEE de 14 barras, un incremento de la carga en la barra 14, hasta 4.3 veces su carga nominal, momento en el cual una de las barras del sistema disminuye su nivel de tensión hasta 0.9 pu. Una vez se alcanza este punto se ejecutan los algoritmos de deslastre de carga. Los resultados se muestran a continuación.

4.5.1 Deslastre de carga según esquemas propuestos

En las figuras 4.1 a 4.3 se puede observar la convergencia de la función aptitud de cada uno de los algoritmos propuestos de deslastre de carga por baja tensión, en este caso para hallar la cantidad mínima de deslastre de carga para un λ_{min} de 0.01.

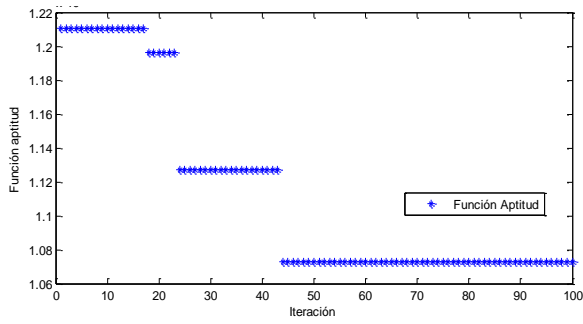


Figura 4.1. Función aptitud para esquema de deslastre de carga usando índice SVSI

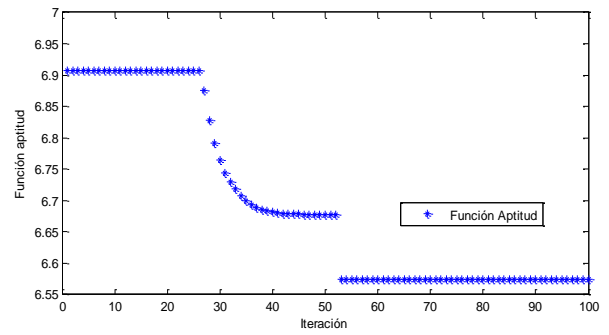


Figura 4.2. Función aptitud para esquema de deslastre de carga usando índice Lmn

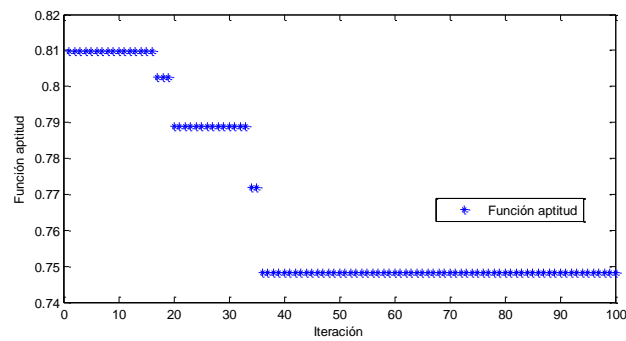


Figura 4.3 Función aptitud para esquema de deslastre de carga usando nivel de tensión en cada barra

En la tabla 4.1. Se puede observar la cantidad y que porcentaje de carga se requiere deslastrar según el margen de estabilidad deseado.

Tabla 4.1 Carga total deslastrada de acuerdo al margen de estabilidad deseado.

MARGEN DE ESTABILIDAD (pu)	CARGA TOTAL DESLASTRADA					
	ESQUEMA 1		ESQUEMA 2		ESQUEMA 3	
	MW	%	MW	%	MW	%
0.01	22.5461387	7.32	22.5207076	7.31	22.5444809	7.32
0.02	22.8906824	7.43	22.8777627	7.42	22.8830418	7.43
0.03	23.3693284	7.58	23.3081915	7.56	23.3583416	7.58
0.04	23.8771195	7.75	23.9488225	7.77	23.9052466	7.76
0.05	24.6798598	8.01	24.6181075	7.99	24.647424	8.00
0.06	25.1204735	8.15	25.0247439	8.12	25.0116682	8.12
0.07	25.6034132	8.31	25.5829879	8.30	25.6063667	8.31
0.08	26.4884913	8.60	26.4160314	8.57	27.0756942	8.79
0.09	27.3859701	8.89	27.0857684	8.79	27.6659194	8.98
0.1	28.7476886	9.33	28.7105671	9.32	29.0569647	9.43

La relación entre el margen de estabilidad y la carga total deslastrada se presenta en la figura 4.4, donde es posible apreciar que entre mayor sea el margen de cargabilidad deseado mayor es la cantidad de carga que se requiere desconectar.

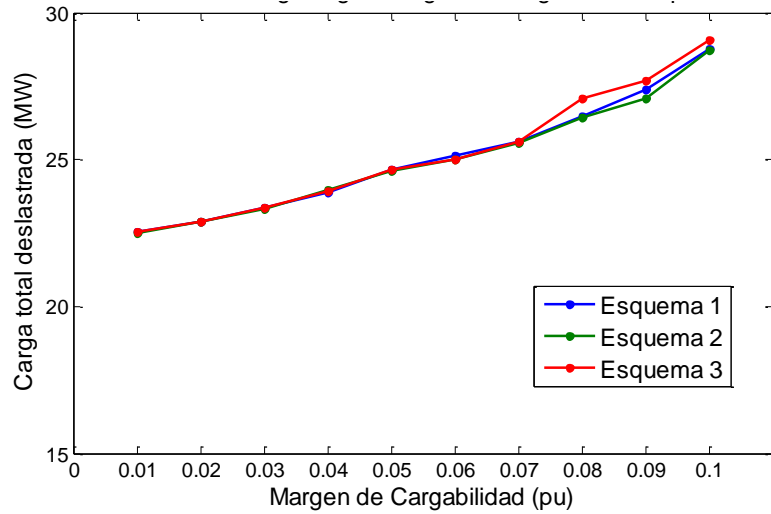


Figura 4.4 Carga total deslastrada Vs. Margen de estabilidad λ_{\min}

Con el fin de demostrar la operación del esquema para valores diferentes de cargabilidad, la cantidad y el porcentaje de carga que se deslastra en cada barra para los márgenes de cargabilidad λ_{\min} 0.01, 0.07, 0.08 y 0.1 se muestran en las tablas 4.2 y 4.3.

Tabla 4.2 Carga total deslastrada por cada barra

BARRA	$\lambda_{\min} (0.01)$						$\lambda_{\min} (0.07)$					
	ESQUEMA 1		ESQUEMA 2		ESQUEMA 3		ESQUEMA 1		ESQUEMA2		ESQUEMA3	
	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%
11	9.65E-11	0	7.20E-09	0	1.10E-11	0	9.40E-12	0	4.30E-09	0	1.70E-11	0
13	2.80E-16	0	8.60E-09	0	7.90E-11	0	3.70E-11	0	1.10E-11	0	7.00E-10	0
3	3.70E-11	0	8.90E-10	0	9.10E-11	0	7.70E-12	0	4.60E-13	0	8.90E-12	0
5	6.60E-11	0	8.90E-09	0	1.90E-12	0	9.50E-13	0	1.20E-10	0	2.40E-10	0
2	1.80E-10	0	6.10E-08	0	3.50E-13	0	2.70E-16	0	9.80E-12	0	4.40E-14	0
6	8.60E-10	0	2.80E-08	0	4.90E-12	0	7.40E-15	0	1.40E-11	0	2.00E-13	0
4	9.60E-12	0	4.30E-08	0	6.20E-12	0	2.40E-12	0	5.60E-12	0	9.30E-12	0
14	22.5461	35.19	22.5207	35.15	22.5445	35.19	25.6034	39.96	25.583	39.93	25.6064	39.97
12	2.70E-11	0	3.20E-09	0	8.10E-09	0	3.10E-12	0	8.20E-12	0	3.90E-13	0
10	8.80E-12	0	5.70E-10	0	7.60E-10	0	5.50E-12	0	6.90E-13	0	1.00E-14	0
9	4.40E-14	0	4.40E-09	0	9.90E-10	0	8.70E-12	0	9.70E-10	0	4.60E-12	0

Tabla 4.3 Carga total deslastrada por cada barra

BARRA	$\lambda_{min} (0.08)$						$\lambda_{min} (0.1)$					
	ESQUEMA 1		ESQUEMA 2		ESQUEMA 3		ESQUEMA 1		ESQUEMA 2		ESQUEMA 3	
	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%
11	2.00E-12	0	2.60E-10	0	4.30E-11	0	8.70E-13	0	6.90E-09	0	2.60E-12	0
13	4.90E-12	0	3.00E-12	0	1.44842	10.73	2.90E-11	0	1.10E-08	0	3.44196	25.5
3	8.50E-12	0	1.10E-13	0	5.90E-11	0	2.70E-11	0	6.20E-12	0	4.70E-11	0
5	2.10E-11	0	3.40E-13	0	9.20E-11	0	8.50E-11	0	2.90E-13	0	5.40E-11	0
2	3.00E-11	0	6.80E-12	0	6.40E-12	0	2.90E-12	0	5.80E-10	0	4.60E-11	0
6	7.80E-10	0	5.10E-13	0	6.60E-14	0	9.40E-11	0	6.30E-11	0	3.90E-11	0
4	0.86905	1.82	0.79812	1.67	4.40E-12	0	3.13828	6.57	3.08223	6.45	6.00E-13	0
14	25.6194	39.99	25.6179	39.98	25.6273	40	25.6094	39.97	25.6283	40	25.615	39.98
12	2.00E-12	0	2.50E-13	0	6.60E-12	0	9.30E-11	0	3.40E-12	0	2.70E-10	0
10	1.50E-12	0	7.30E-13	0	7.80E-13	0	4.90E-15	0	4.00E-10	0	5.50E-11	0
9	5.40E-16	0	2.80E-13	0	2.70E-13	0	4.30E-11	0	6.10E-12	0	3.40E-10	0

Como se observa en la tablas 4.2 y 4.3 hasta el margen de cargabilidad del 7% los tres esquemas coinciden en que solo se deslastra carga en la barra 14, y a partir del margen de cargabilidad del 8% cada esquema continúa deslastrando en otras barras según el criterio de sensibilidad que utiliza para distribuir la cantidad de carga a desconectar. Analizando los resultados obtenidos para esta prueba, el esquema usando el índice de estabilidad de línea Lmn, deslastra carga en segunda prioridad en la barra 13, llegando a deslastrar para el margen más amplio hasta el 25% de su carga total conectada, por su parte los dos esquemas restantes lo realizan en la barra 4 consiguiendo deslastrar en promedio el 6.5% de su carga total conectada para este mismo margen; teniendo en cuenta la topología del sistema de 14 barras, aunque tanto la barra 4 como la barra 13 son barras netamente de carga, la barra 4 es una barra muy cercana a la zona de generación, diferente a la barra 13; lo que permite concluir que para efectos de operación los esquemas basados en el índice de estabilidad de barra SVSI y en el nivel de tensión aventajan al esquema del índice Lmn, ya que este último ataca directamente la zona de carga del sistema.

En la tabla 4.4 se muestra la clasificación de barras críticas según el criterio de sensibilidad de cada esquema.

Tabla 4.4 Clasificación de barras críticas según criterio de sensibilidad

No.	ESQUEMA 1	ESQUEMA 2	ESQUEMA 3
1	14	14	14
2	4	4	13
3	5	5	4
4	9	9	3
5	10	10	5
6	13	3	11
7	12	13	6
8	11	11	10
9	3	12	9
10	2	2	2
11	6	6	12

Con el fin de validar los resultados de los esquemas de deslastre, se presentan los niveles de tensión en el sistema después de la aplicación de cada uno en la tabla 4.5 para algunos márgenes de cargabilidad.

Tabla 4.5 Nivel de tensión después del deslastre

BARRA	TENSIÓN INICIAL	$\lambda_{min} (0.01)$			$\lambda_{min} (0.03)$			$\lambda_{min} (0.05)$			$\lambda_{min} (0.07)$			$\lambda_{min} (0.1)$		
		E.1	E.2	E.3	E.1	E.2	E.3	E.1	E.2	E.3	E.1	E.2	E.3	E.1	E.2	E.3
1	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06
2	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05
3	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
4	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
5	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
6	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07
7	1.02	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.02	1.02	1.02
8	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09
9	0.98	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
10	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
11	1.02	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03
12	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04
13	1.01	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.03
14	0.9	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95

Se resalta que el nivel de tensión en todas las barras del sistema después del deslastre, se encuentra por encima del nivel deseado es decir sobre 0.95pu, como se observa en la figura 4.5, donde se muestra el nivel de tensión después de la aplicación de los tres esquemas de deslastre de carga para un margen de cargabilidad de 0.1.

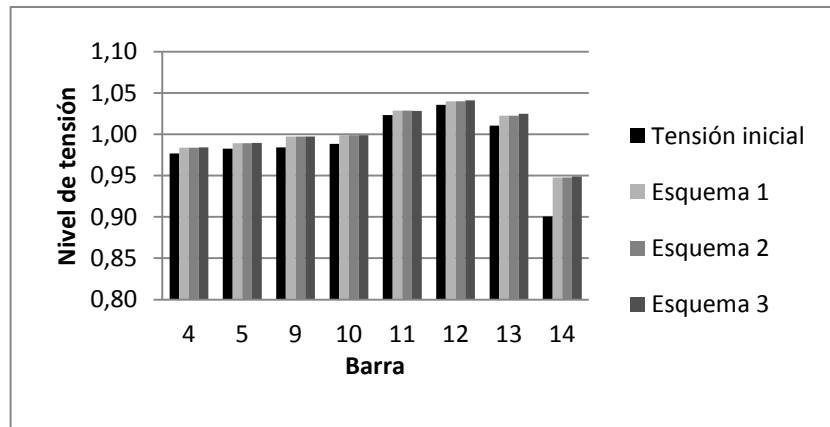


Figura 4.5 Comparación nivel de tensión antes de después de la aplicación de esquemas de deslastre para λ_{min} 0.1

Es importante resaltar que el esquema de deslastre es desencadenado para esta prueba debido a que el nivel de tensión en la barra 14 se encuentra en 0.9pu como se puede ver en la figura 4.5, y que todos los esquemas se enfocan en encontrar la localización y la cantidad de carga a desconectar necesaria para elevar el nivel de tensión en dicha barra por encima de 0.95.

Teniendo en cuenta que es importante verificar la estabilidad de tensión en el sistema después de la aplicación de los tres esquemas de deslastre de carga, se calcularon los índices SVSI y Lmn para cada solución aportada por los algoritmos implementados. En las tablas 4.6 y 5.7 se muestran los resultados de este estudio de la estabilidad del sistema antes y después de la aplicación de los esquemas, para los márgenes de cargabilidad 0.01, 0.07, 0.08 y 0.1,

Tabla 4.6 Estabilidad de tensión después de la aplicación de los esquemas de deslastre.

BARRA	ESTADO INICIAL		$\lambda_{\min}(0.01)$						$\lambda_{\min}(0.07)$					
			ESQUEMA 1		ESQUEMA 2		ESQUEMA 3		ESQUEMA 1		ESQUEMA 2		ESQUEMA 3	
	SVSI	Lmn	SVSI	Lmn	SVSI	Lmn	SVSI	Lmn	SVSI	Lmn	SVSI	Lmn	SVSI	Lmn
11	0.0449	0.0965	0.0415	0.1225	0.0415	0.1225	0.0415	0.1225	0.0427	0.1241	0.0427	0.1241	0.0427	0.1241
13	0.0807	0.2172	0.0595	0.1293	0.0595	0.1293	0.0595	0.1293	0.0606	0.1312	0.0606	0.1313	0.0606	0.1312
3	0	0.2117	0	0.1794	0	0.1794	0	0.1794	0	0.1939	0	0.1939	0	0.1939
5	0.1489	0.1618	0.1262	0.1349	0.1262	0.135	0.1262	0.1349	0.1319	0.1595	0.1319	0.1595	0.1319	0.1595
2	0	0.1069	0	0.0982	0	0.0982	0	0.0982	0	0.1038	0	0.1038	0	0.1038
6	0	0.125	0	0.1225	0	0.1225	0	0.1225	0	0.1241	0	0.1241	0	0.1241
4	0.1933	0.2117	0.1683	0.1794	0.1683	0.1794	0.1683	0.1794	0.1764	0.1939	0.1764	0.1939	0.1764	0.1939
14	0.2837	0.2172	0.1763	0.1293	0.1764	0.1293	0.1763	0.1293	0.1758	0.1312	0.1759	0.1313	0.1758	0.1312
12	0.0516	0.0594	0.0413	0.0494	0.0413	0.0494	0.0413	0.0494	0.0425	0.0497	0.0425	0.0497	0.0425	0.0497
10	0.0782	0.0703	0.0726	0.0972	0.0726	0.0972	0.0726	0.0972	0.0745	0.0988	0.0745	0.0988	0.0745	0.0988
9	0.143	0.1242	0.0727	0.0938	0.0728	0.0938	0.0727	0.0938	0.0745	0.0938	0.0745	0.0938	0.0745	0.0938

Tabla 4.7 Estabilidad de tensión después de la aplicación de los esquemas de deslastre.

BARRA	ESTADO INICIAL		$\lambda_{\min}(0.08)$						$\lambda_{\min}(0.1)$					
			ESQUEMA 1		ESQUEMA 2		ESQUEMA 3		ESQUEMA 1		ESQUEMA 2		ESQUEMA 3	
	SVSI	Lmn	SVSI	Lmn	SVSI	Lmn	SVSI	Lmn	SVSI	Lmn	SVSI	Lmn	SVSI	Lmn
11	0.0449	0.0965	0.043	0.1247	0.043	0.1247	0.0433	0.1234	0.0435	0.1258	0.0435	0.1257	0.0443	0.1228
13	0.0807	0.2172	0.0611	0.1319	0.0611	0.1319	0.0592	0.1298	0.0623	0.1331	0.0623	0.1331	0.0576	0.1281
3	0	0.2117	0	0.1963	0	0.1963	0	0.1956	0	0.2008	0	0.2008	0	0.1999
5	0.1489	0.1618	0.1327	0.1627	0.1328	0.1629	0.132	0.1619	0.1341	0.1681	0.1341	0.1682	0.133	0.1684
2	0	0.1069	0	0.1046	0	0.1046	0	0.1044	0	0.1059	0	0.1059	0	0.1058
6	0	0.125	0	0.1247	0	0.1247	0	0.1234	0	0.1258	0	0.1257	0	0.1228
4	0.1933	0.2117	0.1774	0.1963	0.1775	0.1963	0.177	0.1956	0.1788	0.2008	0.1789	0.2008	0.179	0.1999
14	0.2837	0.2172	0.1775	0.1319	0.1776	0.1319	0.1771	0.1298	0.1812	0.1331	0.1811	0.1331	0.1805	0.1281
12	0.0516	0.0594	0.0429	0.0498	0.0429	0.0498	0.042	0.0501	0.0437	0.05	0.0437	0.05	0.0415	0.0508
10	0.0782	0.0703	0.075	0.0993	0.075	0.0993	0.0754	0.098	0.0759	0.1004	0.0759	0.1004	0.0772	0.0973
9	0.143	0.1242	0.075	0.094	0.075	0.094	0.0754	0.0944	0.0759	0.0944	0.0759	0.0944	0.0771	0.0954

Es posible observar, que si bien la estabilidad de tensión en las barras en el momento que se inicia el deslastre no se encuentra en riesgo (índices SVSI y Lmn por debajo de 0.3), con la aplicación de los esquemas, los índices SVSI y Lmn se minimizan considerablemente en la mayoría de las barras, como se muestra en las figuras 4.6 y 4.7.

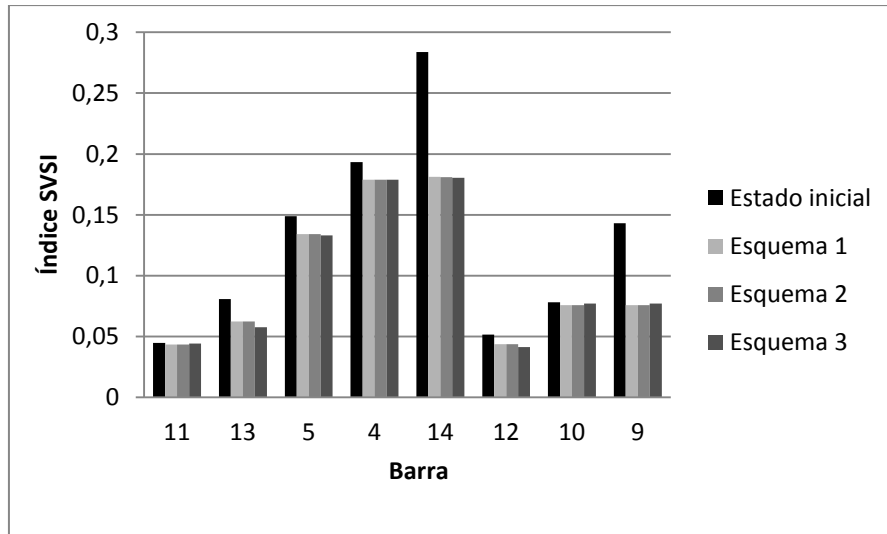


Figura 4.6 Comparación de estabilidad de tensión en barras según índice SVSI para $\lambda_{\min}=0.1$

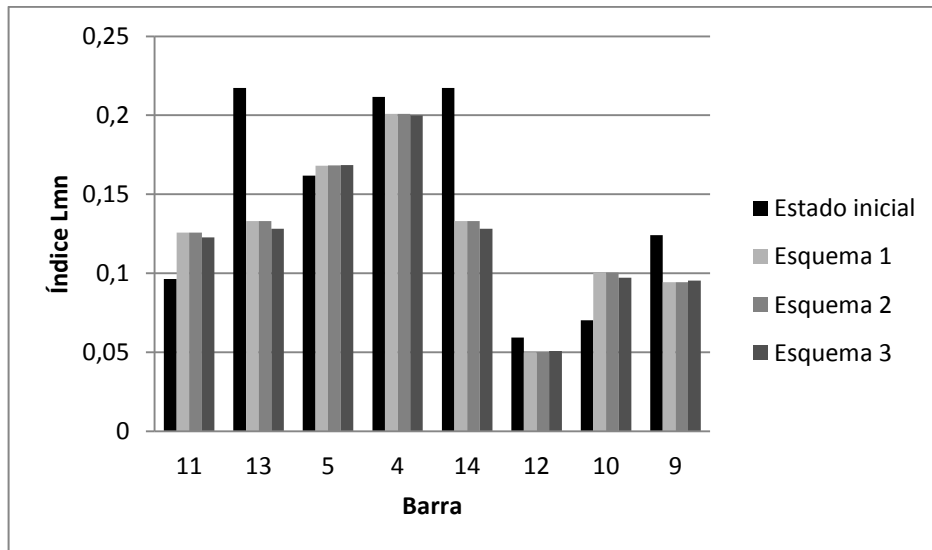


Figura 4.7 Comparación de estabilidad de tensión en líneas según índice Lmn para $\lambda_{\min}=0.1$

4.5.2 Validación de la importancia del esquema de deslastre

En un esquema de deslastre de carga, es importante considerar tanto la cantidad de carga a deslastrar como el lugar donde se realizara la desconexión. Es por esta razón y con el fin de demostrar la importancia de considerar al tiempo estos dos criterios, que se realizaron pruebas de desconexión de la cantidad de carga que los esquemas encontraron necesaria para el restablecimiento de los niveles de tensión en el sistema, en otras barras diferentes a la 14, para la misma contingencia.

Teniendo en cuenta que para los tres esquemas la cantidad de carga necesaria para el deslastre fue similar, se eligieron las cantidades de carga total según el esquema SVSI para la realización de estas pruebas. Se consideran tres escenarios:

- a) Se considera la desconexión de carga en una sola de las barras cercanas a la barra 14. Para este caso fue elegida la barra 9, donde se deslastró la cantidad entregada por el algoritmo (De 22.5 a 28.7 MW según el margen de cargabilidad deseado. Ver tabla 4.1).
- b) Se eligió una de las barras cercanas a la zona de generación, en este caso se seleccionó la barra 4.
- c) Se seleccionaron 4 barras de la zona de carga del sistema, estas fueron las barras 10, 11, 12 y 13 entre las cuales se distribuyó la cantidad de carga total a deslastrar en porcentajes de acuerdo a su capacidad propia.

4.5.2.1 Deslastre en barra 9

Al considerar que las cantidades de carga totales a deslastrar son similares para los tres esquemas en la prueba realizada, se desconectó la cantidad de carga señalada por el esquema SVSI en la barra 9 para la misma contingencia.

Los niveles de tensión alcanzados para cada margen de cargabilidad se muestran en la tabla 4.8. Donde es posible apreciar que a pesar del deslastre de carga, la tensión en la barra 14 que es la que se desea restablecer, no reacciona ante la acción de control y en lugar de mejorar, a partir del margen de cargabilidad 0.06 esta decae hasta 0.89.

Tabla 4.8 Nivel de tensión después del deslastre de carga

BARRA	TENSIÓN INICIAL	λ_{min} (0.01)	λ_{min} (0.02)	λ_{min} (0.03)	λ_{min} (0.04)	λ_{min} (0.05)	λ_{min} (0.06)	λ_{min} (0.07)	λ_{min} (0.08)	λ_{min} (0.09)	λ_{min} (0.1)
1	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06
2	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05
3	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
4	0.98	0.99	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
5	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98	0.98
6	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07
7	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02
8	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09
9	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98	0.98	0.98
10	0.99	1.01	1.01	1.01	1.01	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
11	1.02	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03
12	1.04	1.04	1.04	1.04	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03
13	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
14	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89

4.5.2.2 Deslastre en barra 4

De manera análoga al caso anterior, se desconectó la carga en la barra 4 para la misma contingencia. Los niveles de tensión alcanzados para cada margen de cargabilidad se muestran en la tabla 4.9.

Tabla 4.9 Nivel de tensión después del deslastre de carga

BARRA	TENSIÓN INICIAL	λ_{min} (0.01)	λ_{min} (0.02)	λ_{min} (0.03)	λ_{min} (0.04)	λ_{min} (0.05)	λ_{min} (0.06)	λ_{min} (0.07)	λ_{min} (0.08)	λ_{min} (0.09)	λ_{min} (0.1)
1	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06
2	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05
3	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
4	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
5	0.98	0.99	0.99	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
6	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07
7	1.02	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
8	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09
9	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
10	0.99	1.01	1.01	1.01	1.01	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
11	1.02	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03
12	1.04	1.04	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03
13	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.00	1.00	1.00
14	0.90	0.90	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.88	0.88	0.88	0.88

Para este caso, los niveles de tensión tampoco mejoran, y se observa que entre mayor sea el margen de cargabilidad deseado el nivel de tensión en lugar de restablecerse decae progresivamente.

4.5.2.3 Deslastre en barras de carga 10, 11, 12 y 13

Como en los casos anteriores se deslastro la cantidad de carga total indicada por el esquema SVSI para la perturbación analizada, pero en este caso se deslastro repartiendo dicha carga entre las barras de la zona de carga del sistema 10, 11, 12 y 13 de acuerdo a su capacidad propia. En la tabla 4.10 se muestra dicha distribución.

Tabla 4.10 Porcentaje de la carga total a deslastrar que asumirá la barra para cada margen de cargabilidad.

BARRA	PORCENTAJE DE LA CARGA TOTAL A DESLASTRAR PARA CADA λ_{min} (%)
10	30
11	10
12	20
13	40

Los niveles de tensión alcanzados para cada margen de cargabilidad se muestran en la tabla 4.11.

Tabla 4.11 Nivel de tensión después del deslastre de carga

BARRA	TENSIÓN INICIAL	λ_{min} (0.01)	λ_{min} (0.02)	λ_{min} (0.03)	λ_{min} (0.04)	λ_{min} (0.05)	λ_{min} (0.06)	λ_{min} (0.07)	λ_{min} (0.08)	λ_{min} (0.09)	λ_{min} (0.1)
1	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06
2	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05
3	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
4	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
5	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
6	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07
7	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02
8	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09
9	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98	0.98	0.98	0.98
10	0.99	1	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
11	1.02	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03
12	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04
13	1.01	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02
14	0.90	0.91	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.89	0.89	0.89

A partir de los resultados obtenidos en el numeral 4.5.2, es posible afirmar que es necesaria la inclusión de criterios que indiquen la susceptibilidad de las barras al deslastre, debido a que para recuperar los niveles de tensión después de la ocurrencia de una contingencia, no solo es importante conocer la cantidad total de la carga a deslastrear sino también su localización y distribución entre las barras del sistema. El deslastre de carga por baja tensión es una acción correctiva que no se puede realizar de forma arbitraria.

4.6 Desconexión de línea en la zona de generación del sistema

Con el fin de mostrar la efectividad de los esquemas propuestos frente a perturbaciones que alteren las condiciones de operación del mismo en mayor medida, se realizó una prueba en la cual en el sistema IEEE de 14 barras se desconecta la línea 3-2 y se incrementa su carga hasta 1.5 veces su carga nominal.

4.6.1 Deslastre en todas las barras

En la figura 4.8 se observa como navegan las partículas para encontrar la solución óptima en este caso para el esquema 1, y en las figuras 4.9 a 4.11 se muestra como converge la función aptitud para todos los esquemas implementados, en este caso para hallar la cantidad mínima de deslastre de carga para un λ_{\min} de 0.01.

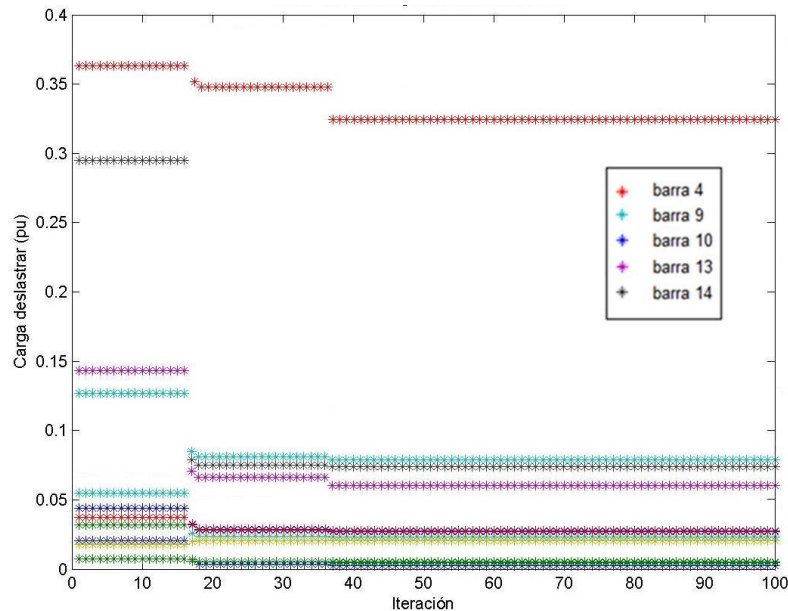


Figura 4.8 Deslastre de carga usando índice SVSI

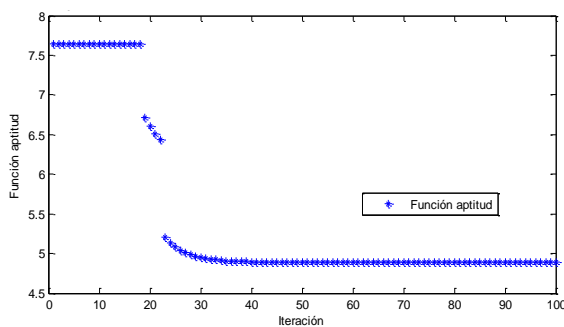


Figura 4.9 Función aptitud para esquema de deslastre de carga usando índice SVSI

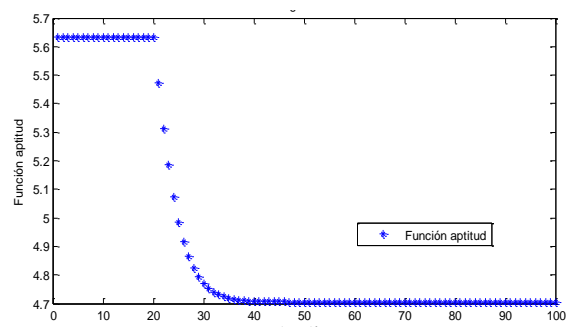


Figura 4.10 Función aptitud para esquema de deslastre de carga usando índice Lmn

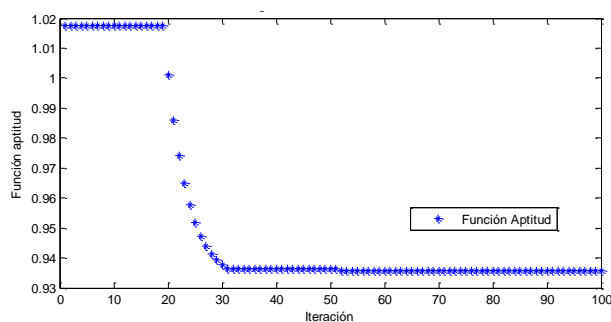


Figura 4.11 Función aptitud para esquema de deslastre de carga usando Nivel de tensión en

De acuerdo a la figura 4.8 es posible visualizar que para las condiciones de operación planteadas para la realización de esta prueba, a diferencia de la prueba anterior, todas las barras intervienen en la desconexión de carga en alguna medida. La cantidad y el porcentaje de carga que se requiere deslastrar según el margen de estabilidad deseado son mostrados en la tabla 4.12.

Tabla 4.12. Carga total deslastrada de acuerdo al margen de estabilidad deseado.

MARGEN DE ESTABILIDAD (pu)	CARGA TOTAL DESLASTRADA					
	ESQUEMA 1		ESQUEMA 2		ESQUEMA 3	
	MW	%	MW	%	MW	%
0.01	64.6252543	16.63	59.657247	15.36	59.6413982	15.35
0.02	66.7031375	17.17	62.4947072	16.09	62.7431718	16.15
0.03	68.8335295	17.72	64.5057867	16.60	64.0303523	16.48
0.04	71.7319101	18.46	66.0044975	16.99	65.9863172	16.98
0.05	73.6564735	18.96	68.4318238	17.61	68.2825356	17.58
0.06	76.4267645	19.67	70.368463	18.11	69.5868329	17.91
0.07	78.5850254	20.23	72.7941686	18.74	72.2818046	18.61
0.08	80.8700523	20.82	74.9728178	19.30	74.9256938	19.29
0.09	82.3504609	21.20	76.2348865	19.62	76.5848814	19.71
0.1	84.8388832	21.84	78.2044059	20.13	78.410543	20.18

La relación entre el margen de estabilidad y la carga total deslastrada es mostrada en la figura 4.12.

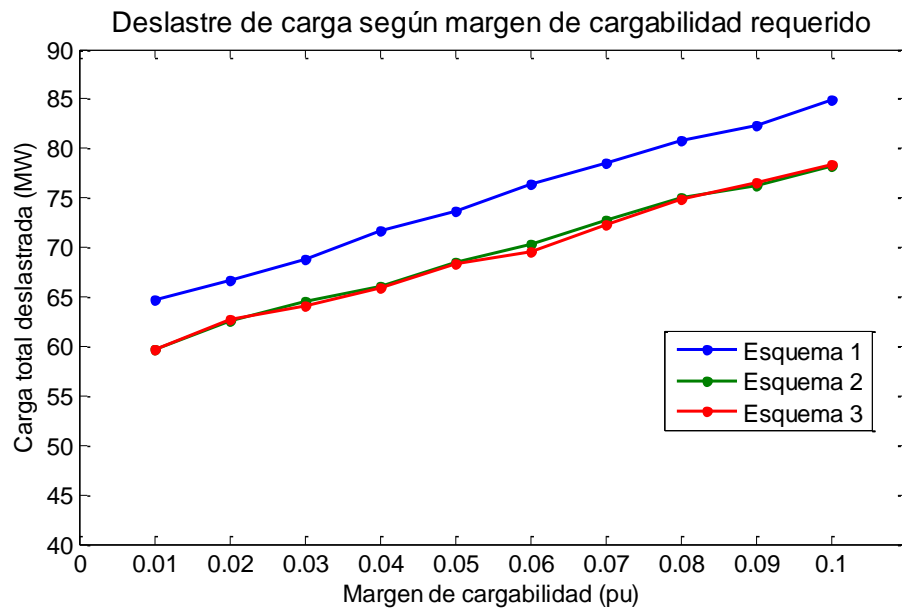


Figura 4.12 Carga total deslastrada Vs. Margen de estabilidad λ_{\min}

La cantidad y el porcentaje de carga que se deslastra en cada barra los márgenes de cargabilidad λ_{\min} 0.01, 0.04, 0.06 y 0.1 se muestran en las tablas 4.13 y 4.14.

Tabla 4.13 Carga total deslastrada por cada barra

BARRA	$\lambda_{\min} (0.01)$						$\lambda_{\min} (0.04)$					
	ESQUEMA 1		ESQUEMA 2		ESQUEMA 3		ESQUEMA 1		ESQUEMA 2		ESQUEMA 3	
	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%
11	0.35145	6.69	0.73358	13.97	0.64721	12.33	1.85076	35.25	1.61659	30.79	0.70847	13.49
13	6.31264	31.17	0.58401	2.88	5.88659	29.07	1.29727	6.41	7.16005	35.36	3.17854	15.7
3	3.55284	2.51	9.7581	6.91	33.2227	23.51	5.43759	3.85	14.535	10.29	35.4116	25.06
5	4.15706	36.47	4.25505	37.32	0.39551	3.47	4.24618	37.25	2.47004	21.67	2.30077	20.18
2	0.39299	1.21	0.7555	2.32	0.15113	0.46	0.01934	0.06	0.29954	0.92	0.44265	1.36
6	0.65483	3.9	0.12791	0.76	0.42904	2.55	0.02297	0.14	0.48097	2.86	2.76703	16.47
4	28.1362	39.24	27.7333	38.68	12.8458	17.92	28.1817	39.31	17.6216	24.58	14.1834	19.78
14	8.38712	37.53	8.91275	39.88	1.63405	7.31	8.40327	37.6	8.54565	38.24	3.68863	16.5
12	0.06824	0.75	0.26277	2.87	0.00716	0.08	0.11292	1.23	2.55213	27.89	1.59709	17.45
10	4.49927	33.33	3.76074	27.86	0.64314	4.76	5.29378	39.21	3.96313	29.36	0.46557	3.45
9	8.42149	19.03	4.20983	9.51	3.77904	8.54	16.7825	37.93	6.48463	14.65	1.24256	2.81

Tabla 4.14 Carga total deslastrada por cada barra

BARRA	$\lambda_{\min} (0.06)$						$\lambda_{\min} (0.1)$					
	ESQUEMA 1		ESQUEMA 2		ESQUEMA 3		ESQUEMA 1		ESQUEMA 2		ESQUEMA 3	
	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%
11	1.09054	20.77	0.96527	18.39	1.53281	29.2	0.00563	0.11	0.91171	17.37	0.22839	4.35
13	1.01242	5	1.3182	6.51	2.50535	12.37	0.83923	4.14	0.19267	0.95	7.20498	35.58
3	10.8979	7.71	18.9552	13.41	47.8115	33.84	20.5372	14.53	28.8806	20.44	52.6324	37.25
5	3.89714	34.19	4.53915	39.82	0.38405	3.37	3.90161	34.22	4.131	36.24	1.82216	15.98
2	0.98489	3.03	0.03521	0.11	0.19321	0.59	0.19595	0.6	0.18	0.55	0.33906	1.04
6	0.18872	1.12	0.60331	3.59	1.47427	8.78	0.70493	4.2	0.96757	5.76	2.22123	13.22
4	25.3661	35.38	19.9826	27.87	12.2774	17.12	27.9758	39.02	20.6873	28.85	8.52075	11.88
14	8.49547	38.01	7.61133	34.06	0.54841	2.45	8.74342	39.12	8.09804	36.23	3.34757	14.98
12	2.4821	27.13	0.65372	7.14	0.74517	8.14	0.73148	7.99	0.02557	0.28	0.93626	10.23
10	4.76258	35.28	3.49788	25.91	1.24658	9.23	4.36968	32.37	3.96752	29.39	1.02601	7.6
9	17.5599	39.68	10.9843	24.82	0.86806	1.96	16.6557	37.64	9.70023	21.92	0.13174	0.3

A diferencia de la prueba realizada en el numeral 4.5.1 es posible observar que para el restablecimiento de los niveles de tensión de acuerdo a las condiciones de operación impuestas sobre el sistema en esta prueba, todas las barras deslastran carga en alguna medida, esto de acuerdo al criterio de sensibilidad incluido para cada algoritmo. En la tabla 4.15 se muestra la clasificación de barras críticas según el criterio de sensibilidad de cada esquema.

Tabla 4.15 Clasificación de barras críticas según criterio de sensibilidad

No.	ESQUEMA 1	ESQUEMA 2	ESQUEMA 3
1	4	4	5
2	5	5	3
3	14	14	4
4	9	9	2
5	10	10	6
6	11	11	13
7	13	3	14
8	12	13	9
9	3	12	11
10	2	2	10
11	6	6	12

Según los resultados expuestos en las tablas 4.12 a 4.15, es posible afirmar que cada algoritmo desarrolla una asignación de carga a deslastrar para cada barra de acuerdo al índice que maneja cada uno, y que dicha distribución de la carga afecta directamente la cantidad de deslastre total.

El nivel de tensión en el sistema después de la aplicación de cada esquema se muestra en la tabla 4.16 para algunos márgenes de cargabilidad.

Tabla 4.16 Nivel de tensión después del deslastre

BARRA	TENSIÓN INICIAL	$\lambda_{\min}(0.01)$			$\lambda_{\min}(0.03)$			$\lambda_{\min}(0.05)$			$\lambda_{\min}(0.07)$			$\lambda_{\min}(0.1)$		
		E.1	E.2	E.3	E.1	E.2	E.3	E.1	E.2	E.3	E.1	E.2	E.3	E.1	E.2	E.3
1	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	0.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06
2	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05
3	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
4	0.9	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
5	0.91	0.96	0.95	0.96	0.95	0.95	0.96	0.95	0.95	0.96	0.96	0.95	0.96	0.95	0.96	0.96
6	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07
7	0.98	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
8	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09
9	0.96	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98	0.99	0.99	0.98
10	0.96	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98
11	1.01	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02
12	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04
13	1.02	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.02	1.03
14	0.95	0.98	0.98	0.97	0.98	0.97	0.98	0.98	0.97	0.97	0.97	0.98	0.97	0.98	0.97	0.97

El nivel de tensión en todas las barras después del deslastre se encuentra por encima de 0.95 en pu. Lo cual indica que el propósito de restablecer los niveles de tensión en todas las barras del sistema con la aplicación de los esquemas de deslastre de carga, se cumple a cabalidad.

En las figuras 4.13 y 4.14 se pueden apreciar con mayor claridad como los niveles de tensión se restablecen en el sistema, para los márgenes de cargabilidad de 0.01 y 0.1 respectivamente.

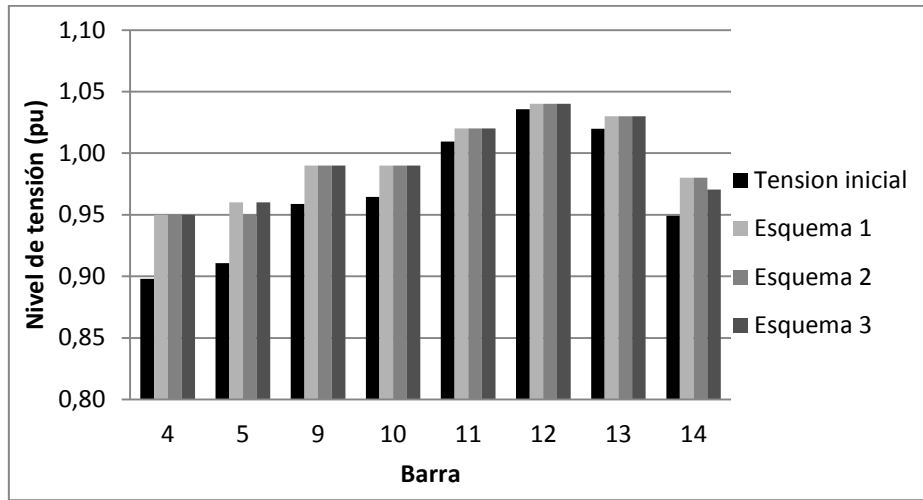


Figura 4.13 Nivel de tensión en todas las barras del sistema después de la aplicación de los esquemas de deslaste de carga para λ_{\min} 0.01

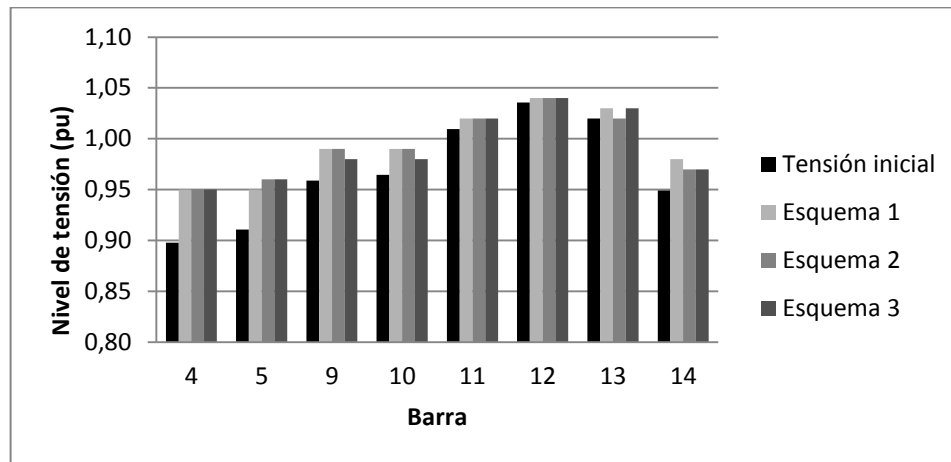


Figura 4.14 Nivel de tensión en todas las barras del sistema después de la aplicación de los esquemas de deslaste de carga para λ_{\min} 0.1

Con el fin de verificar de la estabilidad de tensión en barras y líneas del sistema, después de la aplicación de los esquemas de deslaste de carga, se calcularon los índices SVSI y Lmn para todos los márgenes de cargabilidad estudiados. Los resultados se muestran en las tablas 4.17 y 4.18 para algunos de ellos, donde se puede observar que al momento de iniciar el deslaste de carga, el sistema se encontraba muy cerca de su punto crítico (índices SVSI y Lmn cercanos a la unidad en ciertas barras) y que después de la aplicación de los esquemas estos índices se minimizaron considerablemente en todas las barras.

Tabla 4.17 Estabilidad de tensión después de la aplicación de los esquemas de deslastre.

BARRA	ESTADO INICIAL		$\lambda_{\min} (0.01)$						$\lambda_{\min} (0.04)$					
			ESQUEMA 1		ESQUEMA 2		ESQUEMA 3		ESQUEMA 1		ESQUEMA 2		ESQUEMA 3	
	SVSI	Lmn	SVSI	Lmn	SVSI	Lmn	SVSI	Lmn	SVSI	Lmn	SVSI	Lmn	SVSI	Lmn
11	0,0686	0,1687	0,051	0,1358	0,0508	0,1384	0,0536	0,1338	0,0455	0,1429	0,0521	0,1344	0,0564	0,1335
13	0,0661	0,18	0,0468	0,1454	0,0538	0,1479	0,0521	0,1416	0,0525	0,155	0,0461	0,1418	0,0556	0,1397
3	0	0,5352	0	0,4389	0	0,4463	0	0,4428	0	0,4373	0	0,4511	0	0,4493
5	0,3602	0,7526	0,2586	0,4061	0,2609	0,4087	0,2512	0,3773	0,2614	0,4205	0,263	0,4266	0,2546	0,3875
2	0	0,4577	0	0,1941	0	0,194	0	0,1662	0	0,1975	0	0,2016	0	0,1774
6	0	0,2013	0	0,1358	0	0,1384	0	0,1338	0	0,1429	0	0,1344	0	0,1335
4	0,501	0,5352	0,3631	0,4389	0,3627	0,4463	0,3443	0,4428	0,3662	0,4373	0,369	0,4511	0,3503	0,4493
14	0,1619	0,18	0,1083	0,1454	0,1101	0,1479	0,1295	0,1416	0,1055	0,155	0,1122	0,1418	0,1312	0,1397
12	0,0509	0,0569	0,0413	0,0549	0,0442	0,0531	0,0439	0,0537	0,0445	0,0549	0,0363	0,0521	0,0428	0,0509
10	0,1238	0,1422	0,0885	0,1101	0,0891	0,1128	0,0941	0,1076	0,0812	0,1178	0,0932	0,1081	0,0994	0,1068
9	0,128	0,0957	0,0908	0,089	0,091	0,0885	0,0935	0,092	0,0841	0,0843	0,0958	0,0914	0,0988	0,0938

Tabla 4.18 Estabilidad de tensión después de la aplicación de los esquemas de deslastre.

BARRA	ESTADO INICIAL		$\lambda_{\min} (0.06)$						$\lambda_{\min} (0.1)$					
			ESQUEMA 1		ESQUEMA 2		ESQUEMA 3		ESQUEMA 1		ESQUEMA 2		ESQUEMA 3	
	SVSI	Lmn	SVSI	Lmn	SVSI	Lmn	SVSI	Lmn	SVSI	Lmn	SVSI	Lmn	SVSI	Lmn
11	0,0686	0,1687	0,047	0,1417	0,0501	0,1414	0,0541	0,137	0,0485	0,1428	0,0501	0,1426	0,0592	0,1334
13	0,0661	0,18	0,0524	0,1531	0,0548	0,1521	0,0596	0,1441	0,0548	0,1553	0,0579	0,1537	0,0534	0,1393
3	0	0,5352	0	0,4401	0	0,4532	0	0,4451	0	0,4433	0	0,4558	0	0,4481
5	0,3602	0,7526	0,2608	0,4194	0,2648	0,4313	0,2539	0,38	0,2598	0,419	0,2646	0,431	0,2545	0,3864
2	0	0,4577	0	0,1943	0	0,2017	0	0,1728	0	0,188	0	0,1976	0	0,1788
6	0	0,2013	0	0,1417	0	0,1414	0	0,137	0	0,1428	0	0,1426	0	0,1334
4	0,501	0,5352	0,3651	0,4401	0,3688	0,4532	0,3447	0,4451	0,3606	0,4433	0,3657	0,4558	0,3483	0,4481
14	0,1619	0,18	0,1064	0,1531	0,1137	0,1521	0,1412	0,1441	0,1073	0,1553	0,1148	0,1537	0,1364	0,1393
12	0,0509	0,0569	0,0397	0,052	0,0448	0,0536	0,0468	0,0521	0,0453	0,0542	0,0484	0,0542	0,0441	0,0531
10	0,1238	0,1422	0,0823	0,1165	0,0879	0,1159	0,0969	0,1106	0,0827	0,1177	0,0876	0,1172	0,1031	0,1064
9	0,128	0,0957	0,0845	0,085	0,0894	0,0874	0,0971	0,0932	0,084	0,0845	0,0891	0,087	0,1024	0,0952

En las figuras 4.15 a 4.18 es posible apreciar la notable reducción en los índices de estabilidad de tensión SVSI y Lmn en todas las barras después de la aplicación de los esquemas de deslastre, para los márgenes de cargabilidad 0.01 y 0.1 respectivamente.

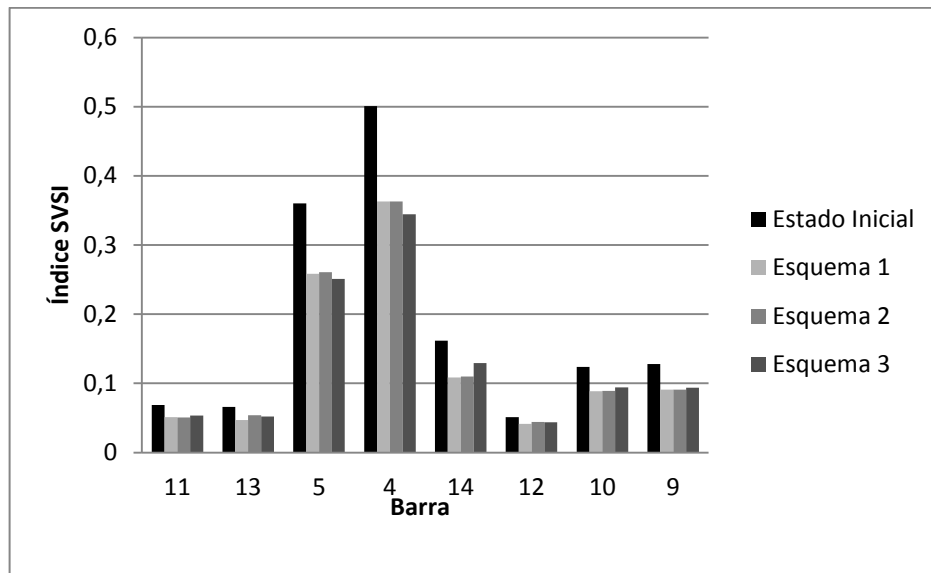


Figura 4.15 Comparación de estabilidad de tensión en barras según índice SVSI para $\lambda_{\min}=0.01$

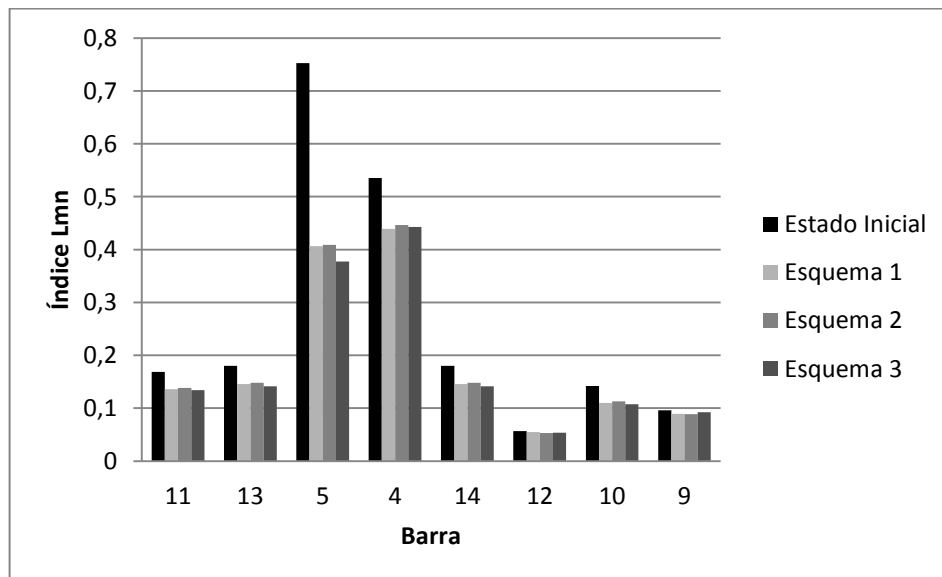


Figura 4.16 Comparación de estabilidad de tensión en líneas según índice Lmn para $\lambda_{\min}=0.01$

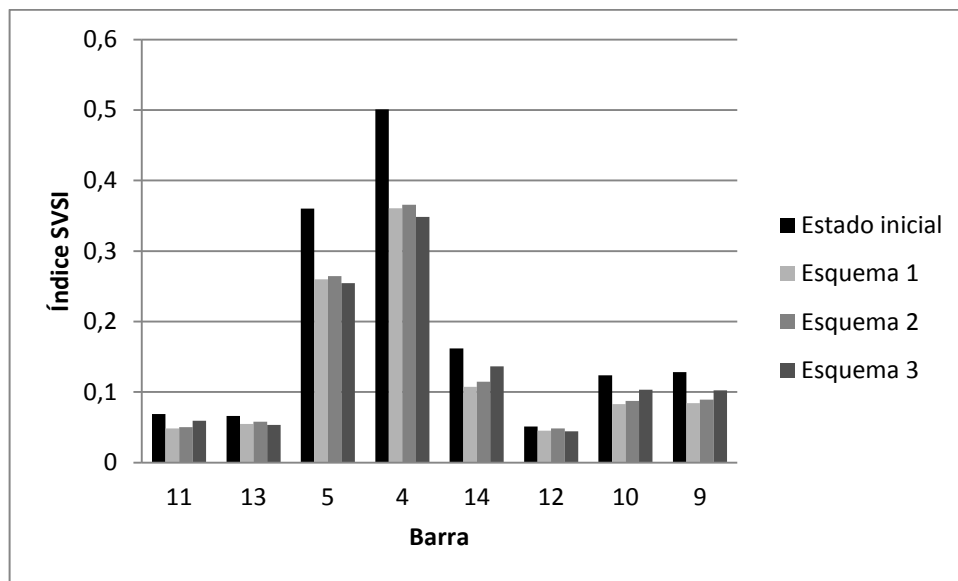


Figura 4.17 Comparación de estabilidad de tensión en barras según índice SVSI para $\lambda_{\min}=0.1$

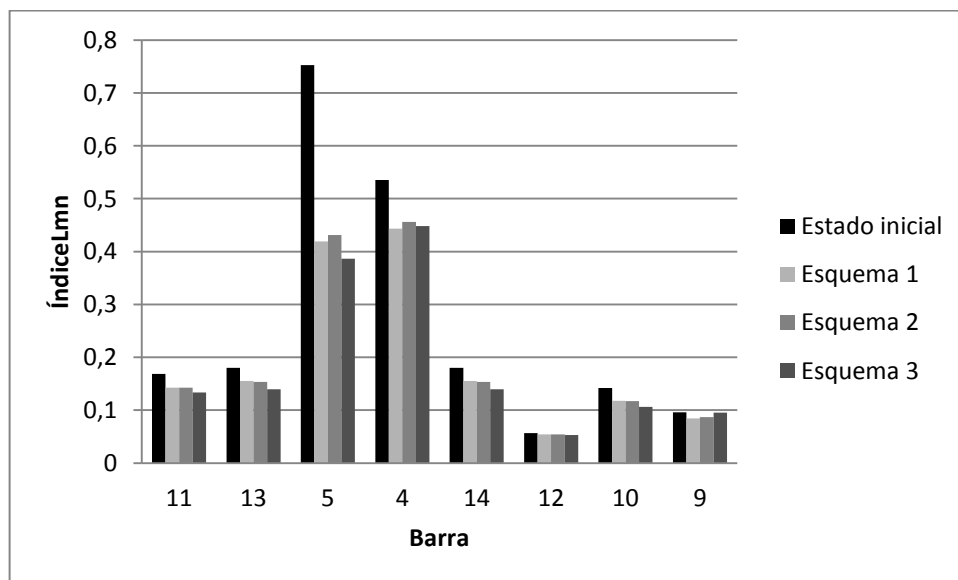


Figura 4.18 Comparación de estabilidad de tensión en líneas según índice Lmn para $\lambda_{\min}=0.1$

Según los resultados anteriores, y las figuras 4.15 a 4.18, se puede observar que si bien todos los esquemas propuestos alcanzaron niveles de tensión por encima de 0.95pu y mejoraron la estabilidad de tensión del sistema en términos de los índices SVSI y Lmn, los niveles de tensión por sí solos no garantizan la estabilidad de tensión en un sistema, puesto

que a pesar de que los niveles de tensión son prácticamente iguales después de la aplicación de los tres esquemas de deslastre de carga, se pueden apreciar bastantes diferencias en los índices de estabilidad para cada barra.

Por lo tanto, aunque el esquema de deslastre de carga teniendo en cuenta el nivel de tensión de cada barra cumple con los niveles de tensión establecidos como deseables en todas las barras (por encima de 0.95 pu), no es un criterio que garantice estabilidad de tensión para el sistema, lo que hace que sus resultados por sí solos no sean confiables, a diferencia de los esquemas que realizan el deslastre a partir de criterios de estabilidad como los esquemas restantes aquí propuestos.

4.6.2 Deslastre en las barras más críticas

Algunas propuestas de deslastre citadas en la literatura, proponen el deslastre en solo algunas cargas, en tanto otras consideran que el aporte del deslastre en todas las barras de carga consiguen el restablecimiento del mismo. Considerando la clasificación de las barras críticas según los criterios de sensibilidad al deslastre utilizados en los tres esquemas, se realizó el deslastre de carga para la misma contingencia, pero en este caso solo se seleccionaron las 5 primeras barras de dicha clasificación, con el fin de establecer si es realmente necesario el deslastre en todas las barras para el restablecimiento de los niveles de tensión del sistema.

Las barras seleccionadas para realizar el deslastre de carga para cada esquema son mostradas en la tabla 4.19.

Tabla 4.19 Barras seleccionadas para realizar el deslastre de carga

No.	ESQUEMA 1	ESQUEMA 2	ESQUEMA 3
1	4	4	5
2	5	5	3
3	14	14	4
4	9	9	2
5	10	10	6

En la tabla 4.20 se puede observar la cantidad y el porcentaje de carga deslastrado según el margen de estabilidad deseado.

Tabla 4.20 Carga total deslastrada de acuerdo al margen de estabilidad deseado.

MARGEN DE ESTABILIDAD (pu)	CARGA TOTAL DESLASTRADA					
λ_{min}	ESQUEMA 1		ESQUEMA 2		ESQUEMA 3	
	MW	%	MW	%	MW	%
0,01	65,1727972	16,78	64,8572652	16,69	59,7166497	15,37
0,02	65,1462243	16,77	65,0974591	16,76	63,1404252	16,25
0,03	65,0779174	16,75	65,2300708	16,79	64,224223	16,53
0,04	65,223377	16,79	65,1695181	16,77	66,3782181	17,09
0,05	65,0639404	16,75	65,2599925	16,80	68,9358163	17,74
0,06	65,1119404	16,76	65,2375923	16,79	70,6775649	18,19
0,07	65,1179174	16,76	65,2442608	16,79	73,5084566	18,92
0,08	65,1184145	16,76	65,2165093	16,79	76,1160949	19,59
0,09	65,2002725	16,78	65,2270468	16,79	78,621598	20,24
0,1	65,2462691	16,79	65,2633932	16,80	81,0590927	20,86

Es posible observar que para los esquemas que incluyen el índice de estabilidad de tensión en barras SVSI y el nivel de tensión como criterios de sensibilidad de las barras al deslastre, las cantidades de carga totales se mantienen prácticamente iguales para todos los márgenes de cargabilidad estudiados, esto se debe a que las barras seleccionadas para realizar el deslastre en esta prueba, alcanzan la máxima cantidad de carga permitida según las condiciones de los esquemas (40% de su carga), como se mostrara en las tablas 4.21 y 4.22 posteriormente.

La relación entre el margen de estabilidad y la carga total deslastrada es mostrada en la figura 4.19

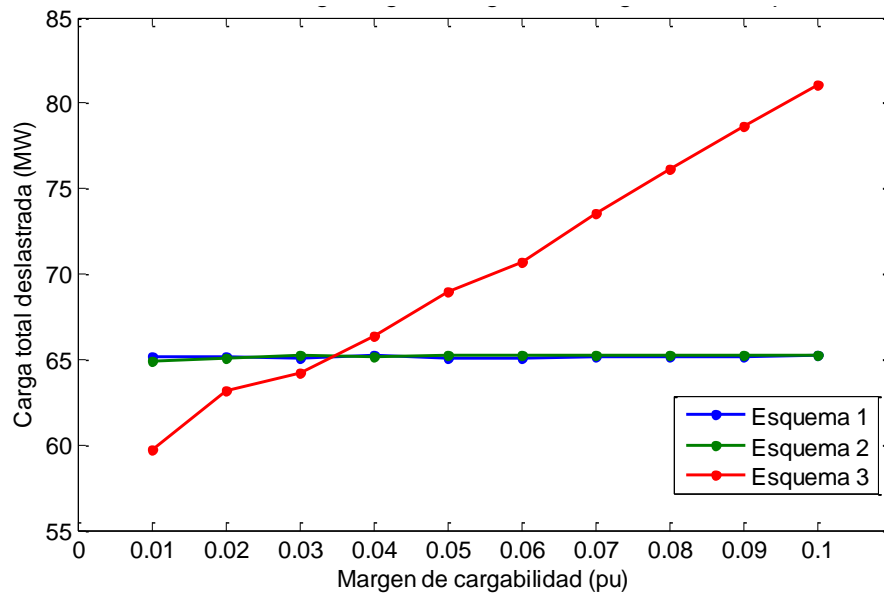


Figura 4.19 Carga total deslastrada Vs. Margen de estabilidad λ_{min}

La cantidad y el porcentaje de carga que se deslastra en cada barra para los márgenes de cargabilidad λ_{\min} 0.01, 0.04, 0.06 y 0.1 se muestran en las tablas 4.21 y 4.22.

Tabla 4.21 Carga total deslastrada por cada barra

BARRA	λ_{\min} (0.01)						λ_{\min} (0.04)					
	ESQUEMA 1		ESQUEMA 2		ESQUEMA 3		ESQUEMA 1		ESQUEMA 2		ESQUEMA 3	
	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	30.3885	21.51	0	0	0	0	48.3377	34.21
5	4.5584	39.99	4.48246	39.32	0.84861	7.44	4.5412	39.84	4.5338	39.77	3.65252	32.04
2	0	0	0	0	0.26462	0.81	0	0	0	0	3.91299	12.02
6	0	0	0	0	1.62191	9.65	0	0	0	0	5.31255	31.62
4	28.664	39.98	28.4937	39.74	26.593	37.09	28.6795	40	28.6801	40	5.16244	7.2
14	8.92909	39.95	8.91366	39.88	0	0	8.93792	39.99	8.93111	39.96	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	5.33131	39.49	5.27489	39.07	0	0	5.38523	39.89	5.35401	39.66	0	0
9	17.69	39.98	17.6926	39.98	0	0	17.6796	39.95	17.6705	39.93	0	0

Tabla 4.22 Carga total deslastrada por cada barra

BARRA	λ_{\min} (0.06)						λ_{\min} (0.1)					
	ESQUEMA 1		ESQUEMA 2		ESQUEMA 3		ESQUEMA 1		ESQUEMA 2		ESQUEMA 3	
	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	45.5864	32.26	0	0	0	0	53.5254	37.88
5	4.52672	39.71	4.56007	40	0.65464	5.74	4.5592	39.99	4.54703	39.89	1.12856	9.9
2	0	0	0	0	0.21241	0.65	0	0	0	0	1.09949	3.38
6	0	0	0	0	5.34133	31.79	0	0	0	0	7.13443	42.47
4	28.5912	39.88	28.6791	40	18.8827	26.34	28.6788	40	28.68	40	18.1704	25.34
14	8.94001	40	8.93364	39.97	0	0	8.93985	40	8.93998	40	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	5.38055	39.86	5.40008	40	0	0	5.37583	39.82	5.39849	39.99	0	0
9	17.6735	39.94	17.6648	39.92	0	0	17.6926	39.98	17.6979	40	0	0

El nivel de tensión en el sistema después de la aplicación de cada esquema es mostrado en la tabla 4.23 para algunos márgenes de cargabilidad.

Tabla 4.23 Nivel de tensión después del deslastre

BARRA	TENSIÓN INICIAL	$\lambda_{\min}(0.01)$			$\lambda_{\min}(0.03)$			$\lambda_{\min}(0.05)$			$\lambda_{\min}(0.07)$			$\lambda_{\min}(0.1)$		
		E.1	E.2	E.3	E.1	E.2	E.3	E.1	E.2	E.3	E.1	E.2	E.3	E.1	E.2	E.3
1	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06
2	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05
3	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
4	0.9	0.94	0.94	0.95	0.94	0.94	0.95	0.93	0.93	0.95	0.93	0.93	0.95	0.92	0.92	0.95
5	0.91	0.95	0.95	0.96	0.95	0.95	0.96	0.95	0.95	0.96	0.94	0.94	0.96	0.93	0.93	0.96
6	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07
7	0.98	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.00	1.00	1.01	1.00	1.00	1.01
8	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09
9	0.96	0.99	0.99	0.98	0.99	0.99	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
10	0.96	0.99	0.99	0.98	0.99	0.99	0.98	0.99	0.99	0.98	0.99	0.99	0.98	0.98	0.98	0.98
11	1.01	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02
12	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04
13	1.02	1.03	1.03	1.02	1.03	1.03	1.02	1.03	1.03	1.02	1.03	1.03	1.02	1.02	1.02	1.02
14	0.95	0.98	0.98	0.96	0.98	0.98	0.96	0.98	0.98	0.96	0.97	0.97	0.96	0.97	0.97	0.96

De acuerdo a los resultados expuestos en las tablas 4.19 a 4.22 es indudable que para los esquemas de deslastre a partir del índice SVSI y del nivel de tensión en cada barra, es insuficiente el deslastre de carga en las 5 barras más críticas, pues los niveles de tensión no se establecieron por encima de 0.95pu en todas las barras; razón por la cual la solución más factible es el deslastre de carga en todas las barras del sistema. Respecto al esquema de deslastre a partir del índice de estabilidad de línea Lmn, es posible observar que se restablecen los niveles de tensión en todas las barras del sistema por encima de 0.95, con una cantidad total de carga deslastrada superior para el deslastre de las barras más críticas que para el deslastre en todas las barras; es por esta razón que se realizó un estudio de la estabilidad del sistema para estos resultados, con el fin de establecer cuál de estas soluciones es más factible de ser implementada.

En la tabla 4.24 es posible observar los resultados obtenidos de dicho estudio de estabilidad a partir de los índices SVSI y Lmn para los márgenes de cargabilidad 0.01, 0.05 y 0.1.

Tabla 4.24 Comparación de estabilidad de tensión de esquemas basados en el índice Lmn para el deslastre en todas las barras y deslastre solo en barras críticas

BARRA	ESTADO INICIAL		$\lambda_{\min} (0.01)$				$\lambda_{\min} (0.05)$				$\lambda_{\min} (0.1)$			
			Esquema 3 (5B)		Esquema 3 (11B)		Esquema 3 (5B)		Esquema 3 (11B)		Esquema 3 (5B)		Esquema 3 (11B)	
	SVSI	Lmn	SVSI	Lmn	SVSI	Lmn	SVSI	Lmn	SVSI	Lmn	SVSI	Lmn	SVSI	Lmn
11	0.069	0.169	0.056	0.138	0.054	0.134	0.058	0.138	0.052	0.137	0.06	0.137	0.059	0.133
13	0.066	0.18	0.061	0.146	0.052	0.142	0.064	0.145	0.058	0.146	0.067	0.143	0.053	0.139
3	0	0.535	0	0.447	0	0.443	0	0.448	0	0.44	0	0.448	0	0.448
5	0.36	0.753	0.255	0.377	0.251	0.377	0.256	0.374	0.251	0.375	0.255	0.388	0.255	0.386
2	0	0.458	0	0.173	0	0.166	0	0.177	0	0.164	0	0.179	0	0.179
6	0	0.201	0	0.138	0	0.134	0	0.138	0	0.137	0	0.137	0	0.133
4	0.501	0.535	0.345	0.447	0.344	0.443	0.347	0.448	0.341	0.44	0.35	0.448	0.348	0.448
14	0.162	0.18	0.14	0.146	0.13	0.142	0.146	0.145	0.125	0.146	0.153	0.143	0.136	0.139
12	0.051	0.057	0.048	0.052	0.044	0.054	0.05	0.052	0.046	0.052	0.053	0.052	0.044	0.053
10	0.124	0.142	0.097	0.112	0.094	0.108	0.101	0.111	0.092	0.111	0.104	0.11	0.103	0.106
9	0.128	0.096	0.096	0.093	0.094	0.092	0.099	0.094	0.091	0.09	0.103	0.096	0.102	0.095

En las figuras 4.20 y 4.21 es posible apreciar gráficamente la comparación de los índices de estabilidad de tensión Lmn y SVSI para los esquemas de deslastre usando el índice de estabilidad de línea Lmn en todas las barras y en las barras más críticas para el margen de cargabilidad 0.1.

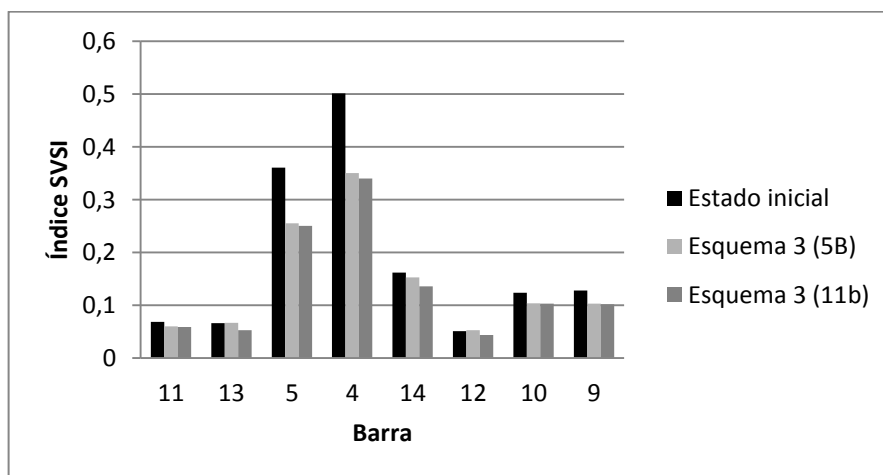


Figura 4.20 Comparación de estabilidad de tensión en barras a partir de índice SVSI para esquemas de deslastre en todas las barras y de deslastre en barras más críticas, para $\lambda_{\min} 0.1$.

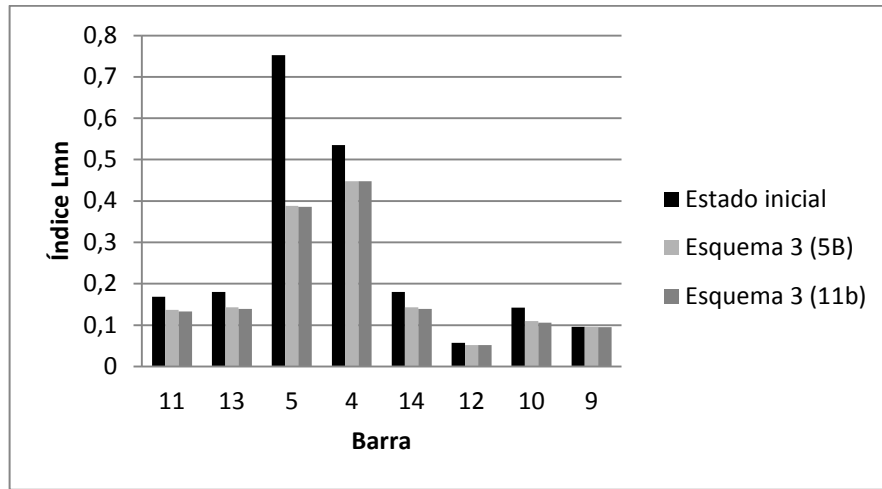


Figura 4.21 Comparación de estabilidad de tensión en líneas a partir de índice Lmn para esquemas de deslastre en todas las barras y de deslastre en barras más críticas, para λ_{\min} 0.1.

A partir de los resultados mostrados en la tabla 4.24 y en las figuras 4.20 y 4.21 es posible concluir que aunque condiciones de estabilidad de tensión después de la aplicación de ambos esquemas de deslastre de carga a partir del índice de estabilidad de línea Lmn en el sistema son similares, el esquema de deslastre de carga en todas las barras mejora en mayor medida dicha estabilidad, además de que presenta menores cantidades de carga total a deslastar para todos los márgenes de cargabilidad estudiados. Es por esta razón y a partir de la conclusión anterior respecto de los esquemas que incluyen el índice de estabilidad de barra SVSI y el nivel de tensión, que las soluciones más factibles para todos los esquemas son las mostradas para el deslastre en todas las barras.

4.7 Desconexión de línea en zona de carga del sistema

Con el fin de mostrar los resultados de los esquemas de deslastre propuestos a partir del uso de la optimización de enjambre de partículas PSO y la inclusión de índices de estabilidad, se realizó sobre el sistema IEEE de 14 barras la desconexión de la línea 9-10 y se realizó un incremento de la carga en el sistema hasta 2.28 veces su carga nominal.

4.7.1 Deslastre en todas las barras

En las figuras 4.22 a 4.24, se puede observar como navegan las partículas y como converge la función aptitud para encontrar la solución óptima en los tres esquemas de deslastre de carga por baja tensión, en este caso para hallar la cantidad mínima de deslastre de carga para un λ_{\min} de 0.01.

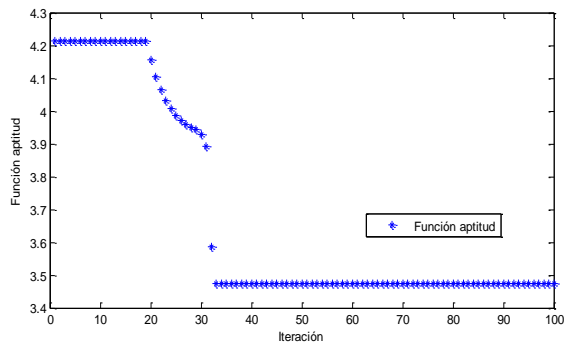


Figura 4.22. Función aptitud para esquema de deslaste de carga usando índice SVSI

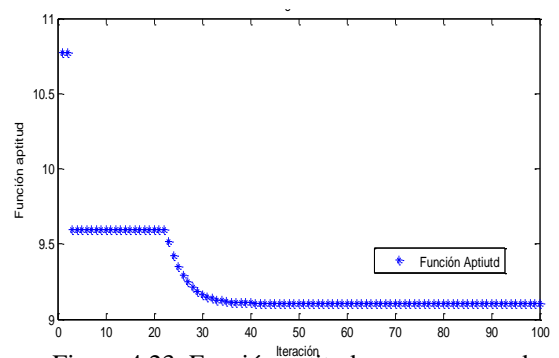


Figura 4.23. Función aptitud para esquema de deslaste de carga usando índice Lmn

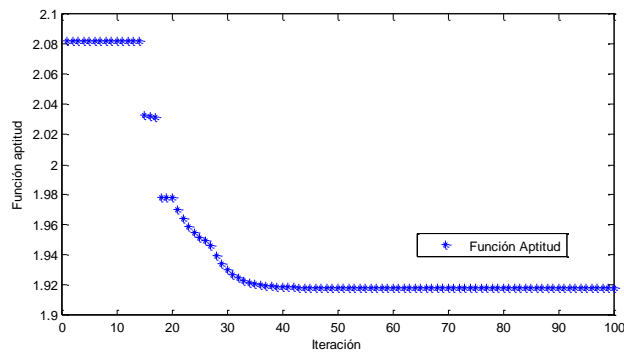


Figura 4.24 Función aptitud para esquema de deslaste de carga usando nivel de tensión en cada barra

La cantidad y el porcentaje de carga que se requiere deslastrar según el margen de estabilidad deseado son mostrados en la tabla 4.25.

Tabla 4.25. Carga total deslastrada de acuerdo al margen de estabilidad deseado.

MARGEN DE ESTABILIDAD (pu)	CARGA TOTAL DESLASTRADA					
	ESQUEMA 1		ESQUEMA 2		ESQUEMA 3	
λ_{min}	MW	%	MW	%	MW	%
0,01	98,5312219	16,69	97,4652251	16,50	97,9401227	16,59
0,02	100,095922	16,95	99,0892139	16,78	99,1289578	16,79
0,03	101,74927	17,23	101,075698	17,12	101,230325	17,14
0,04	102,872115	17,42	102,526654	17,36	102,593269	17,37
0,05	104,641614	17,72	104,176206	17,64	104,483937	17,69
0,06	107,022866	18,12	106,512495	18,04	105,978072	17,95
0,07	108,126387	18,31	107,404092	18,19	107,469252	18,20
0,08	110,440977	18,70	109,592662	18,56	109,649899	18,57
0,09	111,853741	18,94	111,246123	18,84	111,416164	18,87
0,1	113,390964	19,20	112,909307	19,12	113,163329	19,16

La relación entre el margen de estabilidad y la carga total deslastrada es mostrada en la figura 4.25.

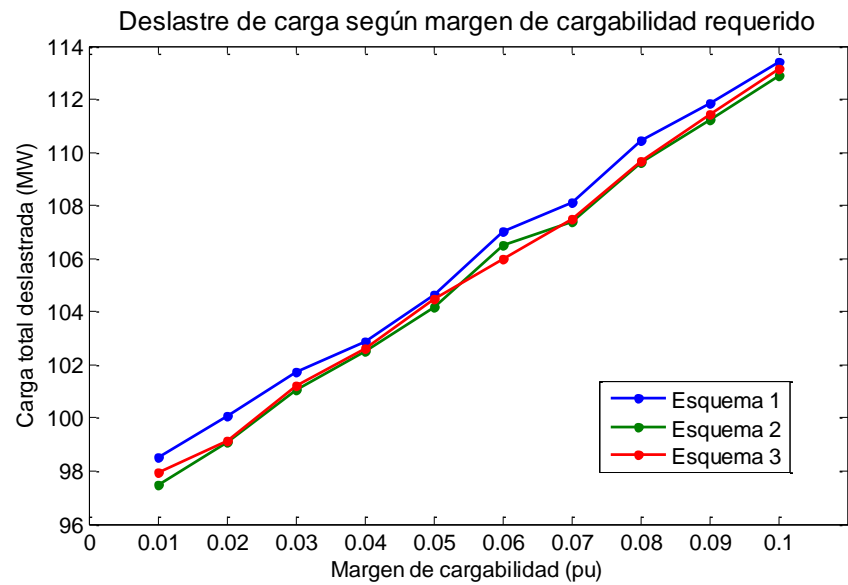


Figura 4.25. Carga total deslastrada Vs. Margen de estabilidad λ_{\min}

De forma similar a la prueba anterior, para estas condiciones de operación del sistema, todas las barras intervienen en el deslaste. La cantidad y el porcentaje de carga que se deslasta en cada barra para los márgenes de cargabilidad λ_{\min} 0.01, 0.04, 0.06 y 0.1 son mostrados en las tablas 4.26 y 4.27.

Tabla 4.26 Carga total deslastrada por cada barra

BARRA	$\lambda_{\min} (0.01)$						$\lambda_{\min} (0.04)$					
	ESQUEMA 1		ESQUEMA 2		ESQUEMA 3		ESQUEMA 1		ESQUEMA 2		ESQUEMA 3	
	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%
11	2,5246	31,64	0,33573	4,21	2,5595	32,07	2,49187	31,23	0,17218	2,16	0,15981	2
13	0,74122	2,41	9,85886	32,03	6,58995	21,41	1,95122	6,34	4,9471	16,07	8,98395	29,19
3	0,52864	0,25	0,63619	0,3	14,5133	6,76	0,39832	0,19	0,91788	0,43	14,5759	6,79
5	5,87097	33,88	5,98532	34,54	3,53137	20,38	6,47013	37,34	6,53333	37,7	3,87391	22,36
2	0,02442	0,05	0,38508	0,78	4,70049	9,5	0,39931	0,81	0,25576	0,52	3,43779	6,95
6	0,27851	1,09	0,74741	2,93	4,14717	16,24	0,4479	1,75	0,68478	2,68	2,03859	7,98
4	42,56	39,05	38,7581	35,56	42,5156	39,01	42,939	39,4	43,4091	39,83	40,9977	37,62
14	12,7401	37,5	13,4221	39,51	6,2955	18,53	12,8826	37,92	13,1743	38,78	10,4867	30,87
12	0,68314	4,91	0,32612	2,34	2,75196	19,79	0,60563	4,35	0,13135	0,94	0,42305	3,04
10	5,69905	27,77	6,74373	32,86	6,22858	30,35	7,61519	37,11	5,98207	29,15	5,57347	27,16
9	26,8806	39,97	20,2666	30,13	4,1067	6,11	26,6709	39,65	26,3189	39,13	12,0425	17,9

Tabla 4.27 Carga total deslastrada por cada barra

BARRA	$\lambda_{min} (0.06)$						$\lambda_{min} (0.1)$					
	ESQUEMA 1		ESQUEMA 2		ESQUEMA 3		ESQUEMA 1		ESQUEMA 2		ESQUEMA 3	
	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%
11	1,55647	19,5	0,01049	0,13	0,38895	4,87	2,35261	29,48	1,45104	18,18	0,83167	10,42
13	5,26903	17,12	11,6164	37,74	11,7014	38,02	8,97061	29,14	11,5657	37,58	11,0069	35,76
3	0,6226	0,29	0,58674	0,27	14,1782	6,6	0,94875	0,44	0,94728	0,44	12,4337	5,79
5	5,94949	34,33	6,8379	39,46	2,67058	15,41	6,6303	38,26	6,13918	35,43	5,04176	29,1
2	0,50151	1,01	0,13352	0,27	3,74986	7,58	0,38037	0,77	0,5486	1,11	3,74237	7,56
6	0,84575	3,31	0,89937	3,52	3,76559	14,75	0,07057	0,28	0,29332	1,15	3,00151	11,75
4	43,5583	39,97	42,6895	39,17	34,8531	31,98	43,1498	39,59	42,8859	39,35	30,4036	27,9
14	13,5784	39,97	12,9089	38	12,992	38,24	12,783	37,63	13,4276	39,53	13,4156	39,49
12	0,93779	6,74	0,33781	2,43	0,39736	2,86	0,3928	2,82	0,97258	6,99	0,85332	6,14
10	8,10588	39,5	3,68918	17,98	8,07992	39,38	7,83967	38,21	8,13065	39,62	5,78997	28,22
9	26,0977	38,8	26,8171	39,87	13,2012	19,63	26,8725	39,95	26,5474	39,47	26,6429	39,61

El nivel de tensión en el sistema después de la aplicación de cada esquema es mostrado en la tabla 4.28, para algunos márgenes de cargabilidad.

Tabla 4.28 Nivel de tensión después del deslastre

BARRA	TENSIÓN INICIAL	$\lambda_{min} (0.01)$			$\lambda_{min} (0.03)$			$\lambda_{min} (0.05)$			$\lambda_{min} (0.07)$			$\lambda_{min} (0.1)$		
		E.1	E.2	E.3	E.1	E.2	E.3	E.1	E.2	E.3	E.1	E.2	E.3	E.1	E.2	E.3
1	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06
2	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
3	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
4	0,90	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
5	0,90	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
6	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07
7	0,97	1,01	1,01	1,00	1,01	1,01	1,00	1,01	1,01	1,00	1,01	1,01	1,00	1,01	1,01	1,00
8	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09
9	0,94	0,98	0,98	0,97	0,98	0,98	0,97	0,98	0,98	0,97	0,98	0,98	0,97	0,98	0,98	0,98
10	0,96	0,99	0,99	0,99	0,99	0,97	0,98	0,99	0,98	0,97	0,99	0,99	0,98	0,99	0,99	0,98
11	1,00	1,02	1,02	1,02	1,02	1,01	1,02	1,02	1,01	1,01	1,02	1,02	1,01	1,02	1,02	1,02
12	1,02	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,04	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
13	1,00	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
14	0,91	0,96	0,97	0,95	0,96	0,97	0,95	0,96	0,96	0,95	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96

El nivel de tensión en todas las barras después del deslastre se encuentra por encima de 0.95 en pu. Lo cual indica que el propósito de restablecer los niveles de tensión en todas las barras del sistema con la aplicación de los esquemas de deslastre de carga, nuevamente se cumple a cabalidad.

En las figuras 4.26 y 4.27 se pueden apreciar con mayor claridad como los niveles de tensión se restablecen en el sistema, para los márgenes de cargabilidad de 0.01 y 0.1 respectivamente.

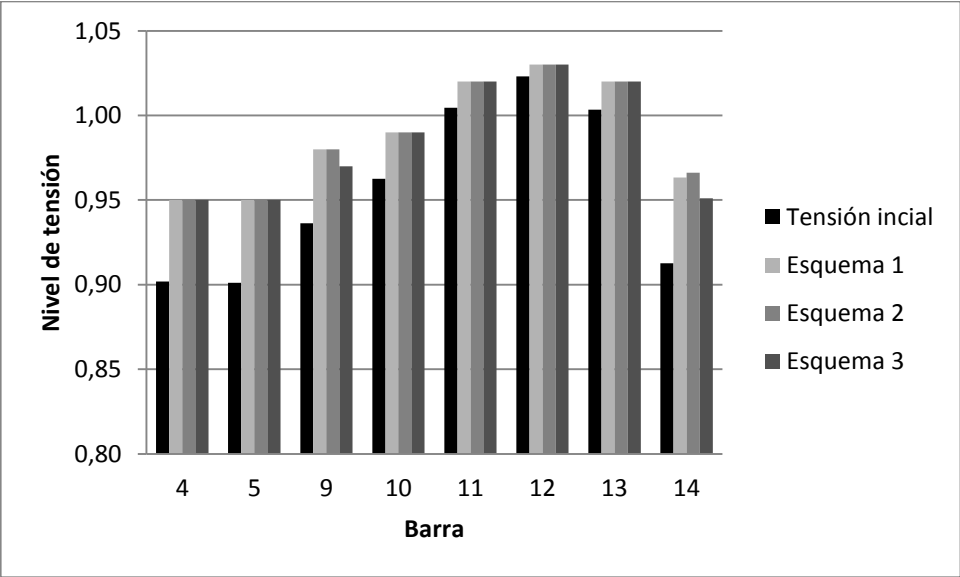


Figura 4.26 Nivel de tensión en todas las barras del sistema después de la aplicación de los esquemas de deslastre de carga para λ_{min} 0.01

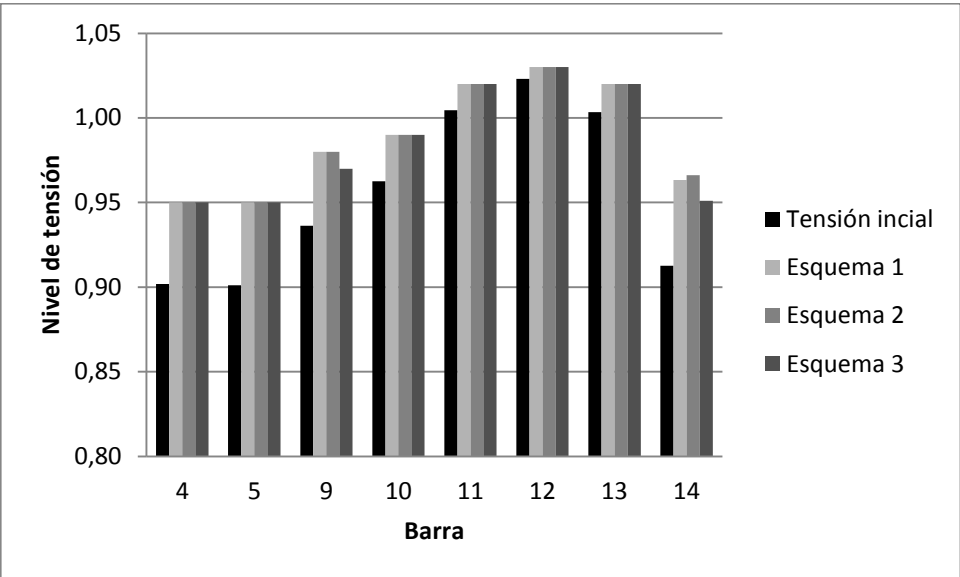


Figura 4.27 Nivel de tensión en todas las barras del sistema después de la aplicación de los esquemas de deslastre de carga para λ_{min} 0.1

Se realizó la verificación de la estabilidad de tensión en barras y líneas del sistema a través del cálculo de los índices SVSI y Lmn, después de la aplicación de los esquemas de deslastre de carga, para todos los márgenes de cargabilidad. Los resultados de este estudio de estabilidad son mostrados en las tablas 4.29 y 4.30, para los márgenes de cargabilidad 0.01, 0.04, 0.06 y 0.1, donde se puede observar que al momento de iniciar el deslastre de carga, en términos de estabilidad de tensión en barras de acuerdo al índice SVSI, el sistema se encuentra en un punto medio donde se aprecian valores cercanos a 0.5 y en cuanto al índice de estabilidad de línea Lmn la línea 1-5 (valor de Lmn asignado a la barra 5) se encuentra por encima de la unidad para ese momento. La diferencia en cuanto a la determinación de la estabilidad en el sistema de acuerdo a los índices calculados, se debe principalmente a las consideraciones y simplificaciones del sistema que realizan los autores para la obtención de los índices de estabilidad. De acuerdo con esto, es posible concluir que para la determinación acertada de la estabilidad en el sistema es necesario el estudio de varios índices al tiempo [50]. En las tablas se puede observar la evolución de los índices después de la aplicación los esquemas los cuales se minimizaron considerablemente en todas las barras.

Tabla 4.29 Estabilidad de tensión después de la aplicación de los esquemas de deslastre.

BARRA	ESTADO INICIAL		$\lambda_{min} (0.01)$						$\lambda_{min} (0.04)$					
			ESQUEMA 1		ESQUEMA 2		ESQUEMA 3		ESQUEMA 1		ESQUEMA 2		ESQUEMA 3	
	SVSI	Lmn	SVSI	Lmn	SVSI	Lmn	SVSI	Lmn	SVSI	Lmn	SVSI	Lmn	SVSI	Lmn
11	0,0964	0,1139	0,0677	0,1037	0,071	0,103	0,0661	0,103	0,0634	0,1018	0,0763	0,1048	0,0779	0,1054
13	0,0902	0,2699	0,0678	0,2216	0,058	0,2021	0,0722	0,1895	0,0688	0,2205	0,0642	0,2241	0,0653	0,2093
3	0	0,5296	0	0,3972	0	0,3997	0	0,4124	0	0,4089	0	0,409	0	0,4163
5	0,3148	1,2824	0,2087	0,4531	0,2077	0,4504	0,2214	0,6459	0,2128	0,4827	0,2138	0,4866	0,2248	0,6946
2	0	0,1377	0	0,1444	0	0,1445	0	0,1443	0	0,145	0	0,145	0	0,1449
6	0	0,1317	0	0,1121	0	0,1042	0	0,1062	0	0,1116	0	0,1117	0	0,1078
4	0,413	0,5296	0,2795	0,3972	0,2826	0,3997	0,2974	0,4124	0,2868	0,4089	0,2872	0,409	0,3003	0,4163
14	0,2063	0,2699	0,1166	0,2216	0,1169	0,2021	0,1641	0,1895	0,1204	0,2205	0,1171	0,2241	0,1387	0,2093
12	0,0726	0,0708	0,0601	0,0663	0,056	0,066	0,0579	0,0588	0,0616	0,0664	0,0604	0,0687	0,0603	0,0658
10	0,1704	0,0765	0,1193	0,0732	0,1196	0,0732	0,116	0,0729	0,1099	0,0725	0,1292	0,0738	0,1323	0,074
9	0,2028	0,1541	0,1268	0,0937	0,1305	0,0959	0,1578	0,1084	0,1299	0,0952	0,1296	0,0942	0,1483	0,1021

Tabla 4.30 Estabilidad de tensión después de la aplicación de los esquemas de deslastre.

BARRA	ESTADO INICIAL		$\lambda_{min} (0.06)$						$\lambda_{min} (0.1)$					
			ESQUEMA 1		ESQUEMA 2		ESQUEMA 3		ESQUEMA 1		ESQUEMA 2		ESQUEMA 3	
	SVSI	Lmn	SVSI	Lmn	SVSI	Lmn	SVSI	Lmn	SVSI	Lmn	SVSI	Lmn	SVSI	Lmn
11	0,0964	0,1139	0,0659	0,1018	0,0867	0,1091	0,0698	0,1022	0,0666	0,1026	0,0686	0,1025	0,0793	0,1063
13	0,0902	0,2699	0,0653	0,2162	0,0565	0,2212	0,0621	0,1955	0,0637	0,2205	0,0594	0,2135	0,0604	0,219
3	0	0,5296	0	0,414	0	0,4143	0	0,4203	0	0,4308	0	0,427	0	0,4279
5	0,3148	1,2824	0,2141	0,4949	0,2145	0,498	0,2249	0,5292	0,2219	0,5496	0,2187	0,5323	0,2283	0,5603
2	0	0,1377	0	0,1452	0	0,1453	0	0,1452	0	0,1094	0	0,1097	0	0,1186
6	0	0,1317	0	0,1097	0	0,1093	0	0,1031	0	0,1101	0	0,1076	0	0,1093
4	0,413	0,5296	0,2898	0,414	0,2902	0,4143	0,3047	0,4203	0,3016	0,4308	0,2986	0,427	0,31	0,4279
14	0,2063	0,2699	0,1198	0,2162	0,1162	0,2212	0,1352	0,1955	0,1255	0,2205	0,1223	0,2135	0,1239	0,219
12	0,0726	0,0708	0,0597	0,0664	0,0567	0,0703	0,0593	0,0649	0,0613	0,0688	0,0578	0,0681	0,0587	0,0689
10	0,1704	0,0765	0,1118	0,0727	0,1494	0,0752	0,1162	0,0729	0,1151	0,0729	0,1162	0,0729	0,136	0,0743
9	0,2028	0,1541	0,1307	0,0957	0,1296	0,0944	0,146	0,1025	0,135	0,0973	0,1332	0,097	0,1356	0,0976

En las figuras 4.28 a 4.31 es posible apreciar la notable reducción en los índices de estabilidad de tensión SVSI y Lmn en la mayoría de las barras después de la aplicación de los esquemas de deslastre, para los márgenes de cargabilidad 0.01 y 0.1 respectivamente.

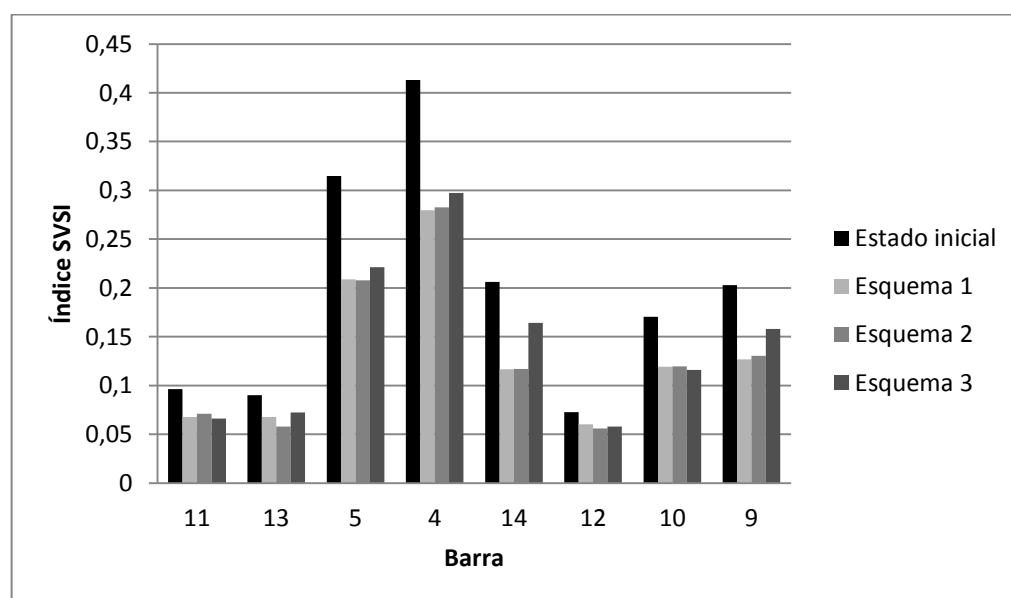


Figura 4.28 Comparación de estabilidad de tensión en barras según índice SVSI para $\lambda_{min}=0.01$

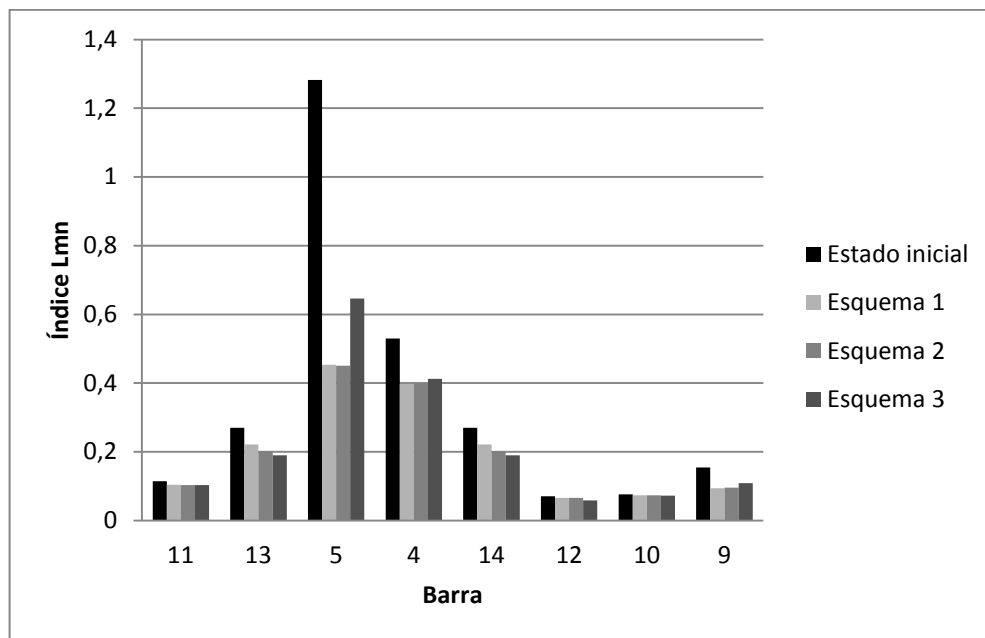


Figura 4.29 Comparación de estabilidad de tensión en líneas según índice Lmn para $\lambda_{\min}=0.01$

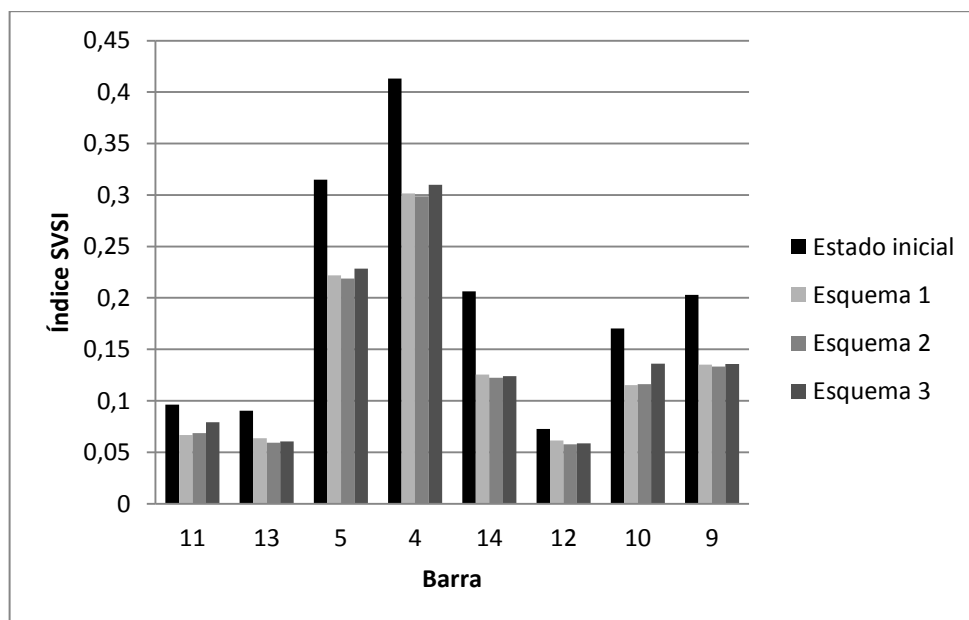


Figura 4.30 Comparación de estabilidad de tensión en barras según índice SVSI para $\lambda_{\min}=0.1$

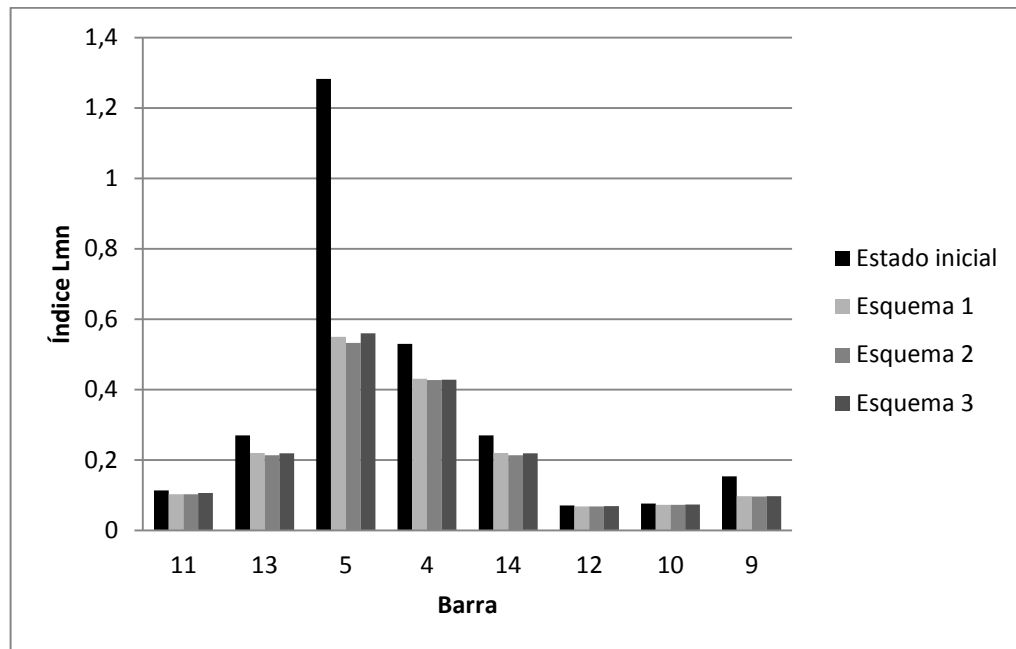


Figura 4.31 Comparación de estabilidad de tensión en líneas según índice Lmn para $\lambda_{\min}=0.1$

Teniendo en cuenta los resultados anteriores, y las figuras 4.26 a 4.31, se confirma la conclusión realizada en la prueba anterior, los niveles de tensión por sí solos no garantizan la estabilidad del sistema.

Capítulo 5

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

A partir de la revisión bibliográfica, de la metodología propuesta y de los resultados obtenidos, en este capítulo se presentan las conclusiones generales y las recomendaciones con respecto al trabajo realizado. Además se presenta una descripción de los trabajos futuros que surgen a partir de los avances logrados en esta investigación.

5.1 Conclusiones generales y recomendaciones

Mantener la estabilidad de tensión en un sistema eléctrico y por ende la operación segura del mismo es una prioridad para los entes operadores. El deslastre de carga por baja tensión es una acción correctiva de control que se implementa en el sistema con el fin de evitar posibles colapsos de tensión cuando las demás herramientas ya han sido agotadas y el sistema aún continúa en riesgo, sin embargo la viabilidad de su implementación depende de la elaboración de un esquema tal que no provoque problemas mayores en el sistema.

De acuerdo con esto, los desafíos fundamentales del deslastre de carga por baja tensión se centran principalmente en encontrar la localización y la cantidad de carga a deslastrar que permitan reestablecer los niveles de tensión en un sistema después de la ocurrencia de una contingencia. Considerando que generalmente los esquemas de desconexión de carga realizan la determinación de la cantidad y la ubicación de la carga a deslastrar a partir de los niveles de tensión en el sistema, los esquemas clásicos incurren en decisiones de deslastre que en ocasiones provocan desconexión innecesaria de carga, que no se deslastre lo suficiente para cumplir el objetivo de esta metodología o que no se asegure la estabilidad de tensión en el sistema después de su aplicación.

En este proyecto de grado se hacen frente a estos inconvenientes clásicos del deslastre de carga, teniendo en cuenta los avances realizados en la investigación de técnicas computacionales inteligentes y de herramientas que permiten conocer la estabilidad de tensión en un sistema eléctrico. De esta manera, se plantea una metodología híbrida de deslastre de carga por baja tensión donde por medio de la optimización por enjambre de partículas y mediante la orientación del algoritmo usando índices de estabilidad de tensión, se encuentre la cantidad de carga a desconectar necesaria para la restauración de las condiciones de operación del sistema.

Se desarrollaron tres esquemas modelando el deslastre de carga como un problema de optimización solucionado mediante PSO. El primero de ellos tiene en cuenta el índice de estabilidad de barra SVSI, el segundo esquema incluye dentro de su función aptitud el índice de estabilidad de línea Lmn, y el tercero se basa en el criterio tradicional del

deslastre de carga por baja tensión, el cual determina la cantidad de carga a deslastrar de cada barra de acuerdo a su nivel de tensión después de la aparición de una perturbación.

De acuerdo a los resultados obtenidos, los tres esquemas basados en la adaptación de la optimización de enjambre de partículas (PSO) al problema del deslastre de carga aquí presentados, son herramientas útiles para recuperar los niveles de tensión en el sistema después de una perturbación severa, sin embargo después del análisis de estabilidad de tensión realizado a las soluciones de cada esquema para las pruebas realizadas, es posible concluir que el criterio de deslastre de carga a partir de los niveles de tensión en las barras del sistema, no garantiza la estabilidad de tensión en el mismo, lo que hace que sus resultados por sí solos no sean confiables. Se demuestra entonces la pertinencia de la inclusión de términos en la función objetivo de índices de estabilidad de tensión como el SVSI y Lmn, los cuales permiten la orientación de cada algoritmo hacia una distribución de la carga total a deslastrar sobre todas las barras del sistema, a partir de criterios de estabilidad.

Teniendo en cuenta los resultados logrados de las pruebas realizadas, es posible observar que si bien el deslastre de carga se realiza en mayor medida sobre las barras críticas, el permitir que el algoritmo de optimización pueda deslastrar carga sobre todas las barras del sistema que considere necesarias para cumplir con el objetivo de la minimización de la cantidad total de carga a deslastrar, hace que este pueda encontrar una mejor solución posible, que si es restringido a solo unas cuantas barras, no solo en términos de reestablecer los niveles de tensión en el sistema, sino también en cuanto al mejoramiento de la estabilidad en el mismo.

Por último, es importante resaltar a partir del análisis realizado en la prueba final de este proyecto en cuanto a la estabilidad de tensión del sistema, que es evidente que el criterio de iniciar el deslastre de carga a partir de los niveles bajos de tensión en el mismo, no son suficientes para protegerlo de un posible colapso de tensión, puesto que se pudo demostrar que en el momento de iniciar el deslastre una de las líneas del sistema ya se encontraba sobre su punto crítico, a pesar de que en cuanto al nivel de tensión apenas había llegado al umbral establecido para desencadenar la acción correctiva de control.

5.2 Trabajos futuros

A partir de los avances logrados en este proyecto de grado, se presentan algunas propuestas para trabajos futuros que permitan seguir avanzando en la búsqueda de metodologías de deslastre de carga por baja tensión.

1. Considerar la pertinencia de involucrar índices de estabilidad de tensión en la señal de alarma para iniciar el deslastre de carga como acción correctiva en el sistema eléctrico.

2. Estudiar la posibilidad de la inclusión de varios índices de estabilidad de tensión tanto de líneas como de barras dentro de un mismo esquema de deslastre de carga por baja tensión, para la búsqueda más precisa de la localización y la cantidad de carga a deslastrar.
3. Considerar dentro de los esquemas de deslastre de carga el redespacho de generación.
4. Estudiar la implementación de los esquemas de deslastre de carga por baja tensión a través del uso de otras metodologías evolutivas o híbridos entre ellas que permitan mejorar la optimización del problema del deslastre.

BIBLIOGRAFIA

- [1] J. B. Gil, “Inestabilidad de tensiones: Criterios de seguridad,” Ph.D. dissertation, Universidad Pontificia Comillas. Madrid, 1993.
- [2] G. M. Valencia, “Análisis de estabilidad de tensión de un modelo básico de un sistema de potencia utilizando teoría de bifurcaciones,” Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, 2009.
- [3] J. J. Benavides y D. F. Maya, “Análisis del método de continuación para el estudio de estabilidad de tensión,” Tesis de pregrado, Universidad Tecnológica de Pereira, 2008.
- [4] J. F. Galvis, “Aplicación de la teoría de bifurcaciones al análisis de estabilidad de un sistema de potencia,” Tesis de pregrado, Universidad Tecnológica de Pereira, 2010.
- [5] P. Kundur, “Power System Stability and Control,” Toronto, *McGraw-Hill, Inc*, pp.27-32, 623 – 626, 1994.
- [6] A. Lerm and A. S. Silva, “Avoiding hopf bifurcations in power systems via set-points tuning”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 19, No. 2, Mayo 2004.
- [7] A. Lerm. “Control of Hopf Bifurcation in Power Systems via Generation Redispatch”, *IEEE Porto Power Tech Conference*, Portugal, Septiembre 10 – 13, 2001.
- [8] T.T. Nguyen and S. R. Wagh, “Model Predictive Control of FACTS Devices for Power System Transient Stability”. *Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific*, Seoul, pp. 1- 4, Octubre 26 – 30, 2009.
- [9] S. Greene, I. Dobson and F. L. Alvarado, “ Sensitivity of the loading margin to voltage collapse with respect to arbitrary parameters,” *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 12, No. 1, pp. 262 – 272, Febrero 1997.
- [10] R. Cespedes, B. Restrepo y H. Roa, “Deslastre de carga en sistemas de potencia” *Ingeniería e investigación*, pp. 30 – 34.
- [11] S. Pahwa, C. Scoglio, S. Das and N. Schulz, “Load-shedding strategies for preventing cascading failures in power grid,” *Taylor & Francis, Electric Power Components and Systems*, Vol. 41, No.9, pp. 879-895, Mayo 2013.
- [12] K. Mollah, M Bahadornajad, N.-K.C Nair and G Ancell, “Automatic under-voltage load shedding: a systematic review” *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1-7. Julio 22-26, 2012.

- [13] S. Niar, A. Abbas, T. Chifong, J. Seabrook, L. Pereira, M. Kreipe, S. Mavis and T. Green, “Undervoltage load shedding guidelines”, Western System Coordinating Council, Julio 1999.
- [14] M. Klaric, I. Kuzle, T. Tomisa, “Simulation of undervoltage load shedding to prevent voltage collapse”, IEEE Power Tech, St. Petersburg, pp. 1-6. Junio 27-30, 2005.
- [15] J. McDonnell, R. Reynolds and D. Fogel, “Special session on applications of evolutionary computation to biology and biochemistry,” *Evolutionary Programming IV: Proceedings of the Fourth Annual Conference on Evolutionary Programming*, pp. 545 – 548, 1995. [15]
- [16] F. Streichert, “Introduction to evolutionary algorithms,” *University of Tuebingen*, 2002.
- [17] D. S. Lee, L.F Gonzales, J. Periaux and K. Srinivas, “Efficient hybrid-game strategies coupled to evolutionary algorithms for robust multidisciplinary design optimization in aerospace engineering,” *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol.15, No. 2, pp. 133 – 150, Abril 2011.
- [18] A. Arias, C. A. Coello and E. Mezura, “Multiobjective evolutionary algorithms in aeronautical and aerospace engineering” *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol.16, No. 5, pp. 662 – 694, Octubre 2012.
- [19] F. Rivas-Dávalos, E. Moreno-Goytia, G. Gutiérrez-Alcatraz and J. Tovar-Hernández, “Evolutionary multi-objective optimization in power systems: state-of-the-art,” *IEEE Power Tech*, Lausanne, pp. 2093 – 2098, Julio 1 – 5, 2007.
- [20] M. Gomez, “Sistema de generación eléctrica con pila de combustible de óxido sólido alimentado con residuos forestales y su optimización mediante algoritmos basados en nubes de partículas”, Tesis Doctoral. Cap 3, pp 39-60. Universidad Nacional de educación a distancia.
- [21] H. E. Lokay and V. Burtnyk, “Application of underfrequency relays for automatic load shedding”. *IEEE transactions on power systems*, Vol. PAS-87, No. 3, pp. 776-783. Marzo 1968.
- [22] Y. R. Omar, I. Z. Abidin, S. Yusof, H. Hashim and H. A. Abdul Rashid, “Under Frequency Load Shedding (UFLS): Principles and Implementation”. *IEEE International conference on Power and energy*, Kuala Lumpur, Malasia, pp. 414- 419. Noviembre 29 – Diciembre 1. 2010.

- [23] V. N. Chuvychin, N. S. Gurov, S. S. Venkata and R. E. Brow, "An adaptive approach to load shedding and spinning reserve control during underfrequency conditions", *IEEE transactions on power systems*, Vol 11. No 4, pp 1805-1810. Noviembre 1996.
- [24] L. Zhang and J. Zhong, "UFLS design by using f and integrating df/dt ". *Power Systems Conference and Exposition*, Atlanta, pp. 1840-1844. Octubre 29 – Noviembre 1. 2006.
- [25] M. Prasad, K. N. Satish, Kuldeep and R. Sodhi, "A synchrophasor measurements based adaptive underfrequency load shedding", *Innovative Smart Grid Technologies*, Kuala Lumpur, pp. 424-428. Mayo 20 – 23. 2014.
- [26] A.Q. Santos, R.M. Monaro, D.V. Coury, and M. Oleskovicz, "Real-time closed loop system controlled by an Artificial Neural Network for estimation of the optimal load shedding", *IET International Conference on Developments in Power System Protection*. Copenhagen, pp. 1-6. Marzo 31- Abril 3. 2014.
- [27] K. Uma Rao, S. Harihara, G. Jayaprakash, G. Ganeshprasad and S. Pillappa, "Time priority based optimal load shedding using genetic algorithm", *Fifth International Conference on Advances in Recent Technologies in Communication and Computing*, Bangalore, pp. 301-308. Septiembre 20–21. 2013.
- [28] A. Shandilya, H. Gupta and J. Sharma, "Method for generation rescheduling and load shedding to alleviate line overloads using local optimisation". *IEEE Proceedings, Generation, Transmission and Distribution*, Vol 140. No. 5, pp. 337-342. Septiembre 1993.
- [29] J. C. Cepeda, D. Ramirez and D.G. Colomé, "Real-time adaptive load shedding based on probabilistic overload", *IEEE Transmission & Distribution Conference and Exposition*. Medellín, Colombia, pp.1-6. Septiembre 10-13. 2014.
- [30] D. Novosel and R. L. King, "Using artificial neural networks for load shedding to alleviate overloaded lines", *IEEE Transactions on power Delivery*, Vol. 9. No. 1, pp.425-433. Enero 1994.
- [31] M. K. Maharana and K. S. Swarup, "Particle swarm optimization based corrective strategy to alleviate overloads in power system", *World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing*. Coimbatore, pp. 37-42, Diciembre 9-11. 2009.
- [32] A. Safdarian, M. Fotuhi- Firuzabad, Y. Tohidi and F. Aminifar, "A fast load shedding algorithm to relieve transmission system overloads", *International Conference on Environment and Electrical Engineering*. Rome, pp. 1-4. Mayo 8-11. 2011.

- [33] R. Verayiah, A. Mohamed, H. Shareef, and I. Zainal Abidil, "Review of under-voltage load shedding schemes in power system operation", *Przegląd elektrotechniczny*, Julio 2014.
- [34] T. W. Carson, "Concepts of undervoltage load shedding for voltage stability," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 7, No. 2, pp. 480 - 488, Abril 1992.
- [35] S. Arnborg, G. Anderson, D. J. Hill and I. A. Hiskens, "On Undervoltage load shedding in power systems," *Elsevier Science, Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 19, No. 2, pp. 141 – 149, 1997.
- [36] R. Balanathan, N. C. Pahalawaththa, U. D. Aannakkage and P. W. Sharp, "Undervoltage load shedding to avoid voltage instability," *IEE Proc –Gener. Transm. Distrib*, Vol. 145, No. 2, pp. 175 – 181, Marzo 1998.
- [37] D. Hazarika, S. Bhuyan and S. P. Chowdhury, "Avoiding risk of voltage instability in a power system through reactive power rescheduling and load shedding," *Taylor & Francis, Electric Power Components and Systems*, Vol. 35, No. 2, pp. 169 – 187, Febrero 2007.
- [38] R. M. M. Pereira, C. M. M. Ferreira and F. P. M. Barbosa, "Influence of load shedding in the voltage stability of an electric power system using trajectory sensitivity analysis," *Universities Power Engineering Conference (UPEC), 45th International*, Cardiff, Wales, pp. 1 – 6, Agosto 31 – Septiembre 3, 2010.
- [39] M. H. A. Hamid, H. Hashim, H. A. A. Rashid and I. Z. Abidin, "Under voltage load shedding using voltage stability indices", *Innovative Smart Grid Technologies. Kuala Lumpur*, pp. 732-736. Mayo 20 – 23. 2014.
- [40] S. S. Danish, A. Yona and T. senjyu, "Voltage Stability Assessment Index for Recognition of Proper Bus for Load Shedding", *International Conference on Information Science, Electronics and Electrical Engineering*. Sapporo, pp. 636-639. Abril 26-28. 2014.
- [41] L. Junzhe, L. Ye, Z. Baohui and L. Wei. "A WAMS based adaptive load shedding control strategy using a novel index of transient voltage stability", *Proceedings of control conferece*. Nanjing, China, pp. 8164-8169. Julio 28 – 30. 2014.
- [42] A. Mahari and H. Seyedi, "A fast online load shedding method for mitigating fidvr based on novel stability index", *Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, Mashhad, pp. 1-6. Mayo 14 – 16. 2013.
- [43] C. Moors, D. Lefebvre, T. Van Cutsem, "Design of Load Shedding Schemes against Voltage Instability", *IEEE Transactions on Power Systems*, pp.1495 – 1500, 2000.

- [44] A. A. Abou, A. Zein El-Din, and S.R. Spea, "Optimal load shedding in power systems," *Power Systems Conference, MEPCON. Eleventh International Middle East*, Vol. 2, El-Minia, pp. 568 – 575, Diciembre 19 – 21, 2006.
- [45] M. Mustafa, H. Abdelhafid, M. R. djamel and A Salem, "Genetic algorithms based optimal load shedding with transient stability constraints", *International Conference on Electrical Sciences and Technologies*. Tunis, pp. 1-6. Noviembre 3-6. 2014.
- [46] T. Amraee, A. M. Ranjbar, B. Mozafari and N. Sadati, "An enhanced under-voltage load-shedding scheme to provide voltage stability," *Elsevier Science, Electrical Power & Energy Systems*, pp. 1038 – 1046, 2006.
- [47] B. Mozafari, T Amraee and Ranjbar, "An Approach for Under Voltage Load shedding Using Particle Swarm Optimization", *International Symposium on Industrial Electronics*. Montreal, pp. 2019-2024. Julio 9-13. 2006.
- [48] B. Hoseinzadeh, F. F. Da Silva and C. L. Bak, "Power system stability using decentralized under frequency and voltage load shedding", *PES General Meeting Conference & Exposition*. National Harbor, MD, pp 1-5. Julio 27-31. 2014.
- [49] Y. Li, and B. Zhang, "The optimization of undervoltage load shedding strategy", *International Conference on Power System Technology*. Chengdu, pp. 164-169. Octubre 20-22. 2014.
- [50] S. Pérez-Londoño, "Propuesta para la identificación y monitoreo de áreas débiles con relación a la estabilidad de tensión en sistemas eléctricos de potencia". Tesis Doctoral. Cap. 2, pp 20-24. Universidad Nacional de Colombia
- [51] L.F Rodríguez, "Análisis de estabilidad de tensión considerando sistemas de monitoreo de área amplia y características de cargas mixtas", Tesis de Maestría. Cap 2, pp 12-14. Universidad Tecnológica de Pereira.
- [52] S. Pérez-Londoño, L.F Rodríguez y G. Olivar, "A Simplified Voltage Stability Index (SVSI)", *Elsevier Science, Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 63, pp. 806 – 813, 2014.
- [53] M. Moghavvemi, F. M Omar, "Technique for contingency monitoring and voltaje collapse prediction", *IEEE Proc.-Gener. Transm. Distrb.*, Vol. 145, No. 6, pp. 634-640. Noviembre. 1998
- [54] U. of Washington. Power systems test case archive.

- [55] Proyecto Intelligent Supervision and Advanced Control System – iSAAC.
<http://www.colombiainteligente.com.co/Proyectos/Pages/iSAAC.aspx>